



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2019년 2월  
박사학위논문

부순모래의 미립자 함유량이  
콘크리트 성능에 미치는 영향

조선대학교 대학원

토목공학과

여권영

부순모래의 미립자 함유량이  
콘크리트 성능에 미치는 영향

Influence of Fine Particles of Crushed Sand on the  
Performance of Concrete

2019 년 2 월 25 일

조선대학교 대학원

토목공학과

여권영

# 부순모래의 미립자 함유량이 콘크리트 성능에 미치는 영향

지도교수 박 정 응

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함.

2018 년 10 월

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

여 권 영

# 여권영의 박사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 金聖中 (인)

위 원 조선대학교 교수 金聖洪 (인)

위 원 조선대학교 교수 金大夏 (인)

위 원 동신대학교 교수 박선준 (인)

위 원 조선대학교 교수 차정웅 (인)

2018년 12 월

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구 배경 및 목적 .....	1
1.2 연구 동향 .....	3
1.2.1 국외 연구동향 .....	3
1.2.2 국내 연구동향 .....	5
1.3 연구내용 및 방법 .....	6
제 2 장 콘크리트의 재료의 특성 .....	8
2.1 부순 모래 .....	8
2.1.1 부순모래의 관련기준 및 국내의 사용현황 .....	8
2.1.2 부순모래의 특성 .....	11
2.1.3 부순모래를 사용한 콘크리트의 성질 .....	13
2.2 화학혼화제 .....	21
2.2.1 화학혼화제의 정의 및 작용기구 .....	21
2.2.2 화학혼화제의 종류 .....	23
2.2.3 콘크리트 용도에 따른 혼화제의 선택방법 .....	28

2.3 동결융해 .....	32
2.3.1 동해에 의한 피해사례 .....	32
2.3.2 콘크리트의 동해발생 메커니즘 .....	35
2.3.3 표면박리 .....	39
제 3 장 실험 방법 .....	43
3.1 콘크리트 공시체 준비 .....	43
3.1.1 시료의 채취 .....	43
3.1.2 체가름 시험 .....	43
3.1.3 잔골재의 밀도 및 흡수율 시험 .....	44
3.1.4 시멘트 .....	44
3.1.5 화학 혼화제 .....	45
3.2 콘크리트 공시체 제작 .....	46
3.2.1 배합내용 및 체가름 시험 골재 계량 .....	47
3.2.2 공시체의 몰드 제작 및 양생 .....	51
3.3 표준 공시체 실험 .....	54
3.3.1 슬럼프·공기량 실험 .....	54
3.3.2 압축강도 실험 .....	56
3.3.3 길이변화율 실험 .....	57
3.3.4 동결융해에 대한 저항성 실험 .....	58
3.3.5 표면박리 실험 .....	60

3.4 파일럿 규모 공시체 실험 .....	61
<b>제 4 장 실험 결과 분석 .....</b>	<b>63</b>
4.1 표준 공시체 실험 .....	63
4.1.1 슬럼프·공기량 실험 결과 분석 .....	63
4.1.2 압축강도 실험 결과 분석 .....	68
4.1.3 길이변화율 실험 결과 분석 .....	71
4.1.4 동결융해에 대한 저항성 실험 결과 분석 .....	74
4.1.5 표면박리 실험 결과 분석 .....	78
4.2 파일럿 규모 공시체 실험 .....	82
4.2.1 슬럼프·공기량 실험 결과 분석 .....	82
4.2.2 압축강도 실험 결과 분석 .....	84
4.2.3 동결융해에 대한 저항성 실험 결과 분석 .....	85
<b>제 5 장 결    론 .....</b>	<b>87</b>
<b>참 고 문 헌 .....</b>	<b>89</b>

## 표 목 차

표 2.1 공기량에 영향을 미치는 요인 .....	23
표 2.2 AE감수제 및 감수제의 주요 효과 .....	24
표 2.3 각종 혼화제를 이용한 후레시 콘크리트의 특성 .....	26
표 2.4 화학 혼화제의 종류 및 품질규격 .....	27
표 3.1 포틀랜드 시멘트 특성 .....	44
표 3.2 화학 혼화제의 물리·화학적 특성 .....	45
표 3.3 표준 공시체 실험 배합 내용 .....	47
표 3.4 공시체 크기 및 강제 캡의 치수 .....	51
표 3.5 시방 배합 내용(1000L) .....	62
표 3.6 현장 수정 배합 내용(1000L) .....	62
표 4.1 슬럼프의 허용차 .....	63
표 4.2 슬럼프 실험 결과 값 .....	63
표 4.3 공기량 허용 오차 .....	64
표 4.4 공기량 실험 결과 값 .....	64
표 4.5 압축강도 결과 값 .....	68
표 4.6 길이 변화량 측정 평균 값 .....	71
표 4.7 길이 변화율 측정 값 .....	72
표 4.8 공명진동수(Hz) 측정 값 .....	74
표 4.9 동결융해에 대한 저항성에 대한 무게 감소량 및 상대동탄성 계수 .....	75
표 4.10 동결융해에 대한 저항성 실험 공시체 표면 변화 .....	75

표 4.11 표면박리 실험 결과 값 ..... 78  
 표 4.12 부피 손실에 따른 등급 ..... 78  
 표 4.13 표면의 시각 등급 ..... 79  
 표 4.14 표면박리 실험 공시체 표면 변화 ..... 79  
 표 4.15 파일럿 규모 슬럼프·공기량 실험 결과 값 ..... 82  
 표 4.16 파일럿 규모 압축강도 결과 값 ..... 84  
 표 4.17 파일럿 규모 동결융해 무게 감소량 및 상대동탄성 계수 85  
 표 4.18 파일럿 규모 동결융해 공시체 표면 변화 ..... 86

## 그림 목 차

그림 2.1	레미콘용 굵은 골재의 품종별 소비형태 .....	9
그림 2.2	레미콘용 잔골재의 품종별 소비형태 .....	9
그림 2.3	각 지역별 레미콘사의 부순모래 사용현황 .....	10
그림 2.4	단위수량과 슬럼프 .....	14
그림 2.5	석분의 종류와 단위수량 .....	15
그림 2.6	석분의 종류와 압축강도 .....	17
그림 2.7	재령과 길이변화율의 관계 .....	18
그림 2.8	재령 1년에서의 건조수축 .....	18
그림 2.9	계면 활성제의 기포작용 .....	21
그림 2.10	계면 활성제의 분산작용 .....	22
그림 2.11	일반·수중부분리 콘크리트의 용적 백분율 .....	31
그림 2.12	건축구조물에서의 동해피해 사례 .....	33
그림 2.13	토목구조물에서의 동해피해 사례 .....	33
그림 2.14	수압설의 개념도 .....	36
그림 2.15	9개의 온도범위에 따른 습윤 콘크리트의 변형률 .....	38
그림 2.16	표면박리의 3가지 타입 .....	39
그림 2.17	동해에 의해 구조물에 발생한 표면박리 현상 .....	40
그림 2.18	동해에 의한 팽아웃 현상 .....	41
그림 2.19	표면박리 손상과 공기량과의 상관관계 .....	42
그림 3.1	체가름 시험 .....	43
그림 3.2	잔골재의 표면건조 포화상태 시험 .....	44

그림 3.3 고성능 AE감수제(GENESIS-300EL) .....	45
그림 3.4 표준 공시체 실험 콘크리트의 제작과정 .....	46
그림 3.5 체가름 골재 계량 .....	48
그림 3.6 게이지 플러그 .....	51
그림 3.7 실험에 사용된 몰드 .....	52
그림 3.8 공시체 제작 후 .....	53
그림 3.9 몰드 양생 .....	53
그림 3.10 슬럼프 실험 과정 .....	54
그림 3.11 공기량 실험 과정 .....	55
그림 3.12 압축강도 시험 장비 .....	56
그림 3.13 탈형 후의 공시체 .....	56
그림 3.14 길이변화 측정기 .....	57
그림 3.15 길이변화 공시체 .....	57
그림 3.16 동결융해 시험기 .....	58
그림 3.17 동결융해 시험기 내부 공시체 .....	58
그림 3.18 동결융해 시험 공시체 .....	59
그림 3.19 동탄성계수 측정기 및 측정 .....	59
그림 3.20 표면박리 실험방법 .....	60
그림 3.21 염화칼슘 회석액 투입 .....	60
그림 3.22 동결융해 시험기 내부 공시체 .....	60
그림 3.23 레미콘 회사 호퍼 부순모래 공정 .....	61
그림 3.24 파일럿 규모 공시체 실험 체가름 골재 계량 .....	61
그림 4.1 미립자 함유량에 따른 슬럼프 실험결과 .....	66

그림 4.2 미립자 함유량에 따른 공기량 실험결과 .....	66
그림 4.3 혼화제 사용량에 따른 슬럼프 실험결과 .....	67
그림 4.4 혼화제 사용량에 따른 공기량 실험결과 .....	67
그림 4.5 미립자 함유량에 따른 압축강도 실험결과 .....	70
그림 4.6 혼화제 사용량에 따른 압축강도 실험결과 .....	70
그림 4.7 미립자 함유량에 따른 길이변화율 실험결과 .....	73
그림 4.8 혼화제 사용량에 따른 길이변화율 실험결과 .....	73
그림 4.9 미립자 함유량에 따른 표면박리 무게 감소량 .....	80
그림 4.10 혼화제 사용량에 따른 표면박리 무게 감소량 .....	81
그림 4.11 파일럿 규모 슬럼프 실험결과 .....	83
그림 4.12 파일럿 규모 공기량 실험결과 .....	83
그림 4.13 파일럿 규모 압축강도 실험결과 .....	84

## ABSTRACT

### Influence of Fine Particles of Crushed Sand on the Performance of Concrete

Yeo, Kwon Young

Advisor : Prof. Park, Jeong Ung, Ph.D.

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

Due to the large-scale constructions in the 1970s, which involved excessive extractions of natural resources including large amounts of river sand and river gravel, South Korea has depleted resources and faced natural environment conservation issues, and the necessity of developing alternative resources for fine aggregate has emerged. One of the typical alternative fine aggregates, crushed sand is produced by crushing, grinding, polishing, selecting, and washing quarry stones from stony mountains. Being made using aggregate crushing machines such as jaw crushers or cone crushers, crushed sand includes thin or narrow stone debris when adjusting the particle size of aggregate and contains rough particle forms of aggregate and a lot of fine particles; compared to natural aggregate, it can be uneconomical due to the increase in unit quantity, and concrete vulnerable to durability issues can be manufactured. Accordingly, it is necessary to establish and manage proper quality standard unlike the use of natural fine aggregate.

This research investigated the effect of high-performance AE water-reducing agent and the content of fine particles produced in the process of manufacturing crushed sand on the performance of concrete. For this, crushed sand was collected, a sieve analysis test was carried out, the content of fine particles was divided into acceptable quality limits and 5 different levels out of the limit (0%, 2%, 7%, 15%, 22%), and the effect of the amount of high-performance AE water-reducing agent (constant at 0.70%) on the concrete performance was explored. As it is highly likely that a large quantity of fine particles can be included at the field, different quantities of high-performance AE water-reducing agent (0.70%, 0.85%, and 1.00%) were applied to the content of fine particles of 22% to investigate the effect of the amount of added high-performance AE water-reducing agent on the concrete performance. For this, test for slump, air content, compressive strength, resistance to freezing and thawing, length change, surface delamination and pilot-scale test pieces were performed.

As a result, the workability of test pieces within the upper and lower limits of the particle size distribution was good, while test pieces out of the upper and lower limits of the particle size distribution showed poor workability. However, admixtures increased from 0.70% to 0.85%-1.0% showed improved workability. According to the freezing and thawing test, the test piece with the greatest air content showed the lowest weight loss, while its relative dynamic modulus of elasticity was the highest. On the other hand, the test piece that showed low air content, high slump, and segregation had the highest weight loss and the lowest relative dynamic modulus of elasticity. In the surface delamination test, weight loss was 14 times greater in the test piece with 22% of fine particles compared to the one

with 0% of fine particle. This is because, without fine particles, gravel subsides and a thick covering layer is formed, causing less surface delamination; with fine particles, gravel and fine particles are well mixed together and a thin covering layer is formed, causing a lot of surface delamination.

Finally, the more the fine particles, the poorer the workability but the better effect on the concrete performance. Meanwhile, if workability deteriorated due to a lot of fine particles, adding high-performance AE water-reducing agent helped improve workability. Therefore, even though the content of fine particles was out of the acceptable limits, increasing or decreasing the amount of high-performance AE admixtures could help meet the quality standard.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

우리나라는 1970년대부터 국가주도의 경제부흥 정책에 따라 철도, 도로, 항만, 댐, 공항, 대규모 주거단지 등 SOC 사업이 활발히 이루어져 괄목할만한 경제성장을 이루었다. 그러나 이러한 대규모 공사로 인한 다량의 강모래, 강자갈 등 천연자원의 무분별한 채취로 인해 자원이 고갈되고 자연환경보전 문제 등으로 인해 대체자원 개발에 대한 필요성이 대두되고 있다. 하천 천연골재의 채취는 우수 왜곡, 하상구배 변화, 유속의 증가로 자연 생태계 교란과 서식지 파괴 등 환경문제를 발생시키며 교량, 제방, 보와 같은 하천구조물에 세굴과 침식을 발생시켜 구조적 안정성에 치명적인 문제를 일으킨다. 또한 강모래의 부족을 대체하기 위해 해사의 활용이 증가되었으나 어장파괴, 해안침식 등 환경문제를 발생시켜 재료수급이 어려워짐에 따라 환경 친화적이고, 지속발전이 가능한 대체골재 수급방안 마련이 시급한 실정이다.

1980년대에 이르러 천연골재 고갈문제가 심화되어 콘크리트용 골재 중 굵은 골재는 부순 굵은 골재로 대체되어 사용되었으나, 잔골재에 경우 자연사를 대체할 뚜렷한 대체재가 없어 다양한 수급방안이 연구되고 있다. 잔골재의 부족으로 양질의 콘크리트 품질 확보가 어려워짐에 따라 궁극적으로 구조물의 강도, 내구성, 수밀성, 강제보호 성능이 저하되고 균열, 열화현상 등 주요 하자발생의 원인이 되고 있다.

천연골재인 강모래 및 바다모래는 파쇄가 필요없어 경제성이 좋으며, 콘크리트에 미치는 내하력 또한 우수하여 지금까지 사용되어왔다. 하지만 천연골재의 무분별한 채취로 인해 자원이 고갈되고 자연환경보전 문제 등으로 규제가 심해지면서, 잔골재의 대체재 확보를 위해 부순모래, 인공모래, 고로슬래그, 폐골재 재생 등 다양한 잔골재로 사용되어지나, 현 시점에서 잔골재의 수급문제를 해결하기 위해서는 석산을 활용하여 양질의 부순모래를 생산 및 공급하는 것이 가장 현실적인 방안이다. 1966년에 콘크리트용 골재 표준의 제정을 시작으로 1967년엔 부순골재에 대한 규격이 제정되었으며, 1983년 부순모래 사용이 확대되기 시작하였을 때 'KS F 2558 콘크리트용 부순모래'에 대한 규격이 제정되었다. 이 후의 주요 개정으로 1993년에 각 체에 통과하는 골재입도의 중량백분율 조정과 알칼리-골재 반응(AAR)이 추가되어 개정되었으며, 1997년 개정에서 콘크리트 골재의 규격이 절대건조밀도, 안정성, 흡수율, 마모율, 미립자로 구성되

었다가 2002년 골재 규격의 통일성을 위해 “KS F2527 콘크리트용 부순골재”로 개정되고, 2016년에는 천연, 부순, 고로슬래그, 경량골재 등 굵은 골재와 잔골재를 통합하여 “KS F 2527:2016 콘크리트용 골재”로 개정하였다.

한국도로공사의 일부 도로건설 현장에서 자연모래와 혼합된 합성골재 형태 이용이 되고 있으며, 한국도로공사에서는 2003년 부순모래 잠정기준 제정과 2005년 부순모래를 사용한 콘크리트의 최적배합, 2008년 부순모래 현장 적용성 검토“ 등을 실시하였고, 2017년에는 고속도로 건설재료 품질기준의 개정으로 한국 산업규격에서 정한 기준보다 상향된 품질 조건을 요구함에 따라 골재 난으로 인한 공사 차질이 우려되어 대체 잔골재의 연구가 필요하다.

대표적인 대체 잔골재로 사용되는 부순모래는 석산의 원석을 공급하여 파쇄, 분쇄, 연마, 선별, 세척 과정을 거쳐 생산된다. 이러한 부순모래는 조크러셔 또는 콘크러셔와 같은 골재 파쇄장비를 활용하여 골재입도 조정 시 얇거나 가는 석편이 함유되어 골재 입형이 거칠어지고 미립자가 많이 발생한다. 그러나 부순모래의 미립자가 작업성 뿐만 아니라 콘크리트의 강도 및 내구성에 미치는 연구가 미흡하다.

따라서 본 연구에서는 고성능 AE감수제 사용량을 0.70%로 일정하게 하고 부순모래의 미립자를 잔골재 무게의 22%, 15%, 7%, 2%, 0%로 설정하여 부순모래의 미립자가 콘크리트의 미치는 영향에 연구를 진행하였다. 또한 현장에서는 다량의 미립자가 포함될 가능성이 높기 때문에 미립자 함유량이 22%에 대해 고성능 AE감수제의 용량을 0.70%, 0.85%, 1.00%로 변화시켜 고성능 AE감수제의 사용량에 따른 콘크리트 성능에 미치는 영향을 고찰하였다. 이를 위해 슬럼프, 공기량, 압축강도, 동결융해에 대한 저항성, 길이변화율, 표면박리, 파일럿 규모 공시체 실험을 실시하였다.

## 1.2 연구동향

### 1.2.1 국외 연구동향

콘크리트용 잔골재로서 부순모래를 본격적으로 활용한 1964년 미국의 NCSA의 기술 위원회가 설립된 이후로부터라 할 수 있다. NCSA 기술위원회는 천연잔골재의 대체잔골재로서 부순모래를 활용하기 위하여 Kalcheff(1977)를 중심으로 부순모래의 특성 및 콘크리트의 성질에 대한 연구를 진행하여 1970년대에는 사용량이 매년 2배로 증가하였다.

당시 NCSA 기술위원회는 부순모래의 미립자 함유량이 증가함에 따라 조립율은 감소되며, 동일한 유동성을 만족하기 위해 단위수량은 증가되는 반면, 블리딩수는 미립자 함유량 5% 정도에서도 강모래나 미립자를 포함시키지 않은 콘크리트에 비하여 50%정도 감소되는 것으로 나타났다. 콘크리트의 건조수축은 미립자 함유량이 5%까지는 큰 영향을 미치지 않는 않지만, 압축강도에서는 빈배합에서는 증가되고, 부배합에서는 감소하는 것으로 보고하였다. 실험결과를 기초로 ASTM 33-90에는 미립자 함유량의 허용 범위를 3%, 5%, 7%로 사용목적에 따라 달리 규정하고 있다. 부순모래의 입형을 판정하는 방법은 골재 사이 공극개념을 도입한 입형지수가 제안되었으며, 기존 천연자원의 콘크리트와 비슷한 입형을 나타내기 위한 입형지수는 약 52.5% 정도로 밝혀냈다. NCSA에서는 콘크리트의 역학적 성질 및 유동성에 지장을 주지 않는 입형지수 범위를 53.5% 이하로 제안하였다.

노스캐롤라니아 도로교통국은 정부기관으로서는 처음으로 높은 미립자 함유량을 가지고 있는 부순모래를 사용할 수 있도록 하였다(Mc Keagney 1985, Saunders, 1995). 사용되었던 부순모래에 관한 보고서는 고속도로 건설에 처음으로 사용되었으나 과도한 블리딩, 마감의 어려움 및 작업성이 감소함에 의하여 좋은 결과를 얻지는 못하였다. 그러나 미립자의 증가로 인해 워커빌리티는 증가하였고, 블리딩은 감소하였으며, 이는 미립자에 의한 공극충전효과로 인한 것이다.

일본의 경우 1970년대 말 산업부산물로 취급되었던 부순모래를 효율적 이용측면에서 콘크리트 잔골재로 활용하기 위해 일본쇄석협회 중심으로 연구가 추진되었으며, 미립자 함유량이 10% 이내에서는 블리딩, 슬럼프 및 공기량 등의 콘크리트의 유동성 영향을 미치지 않지만, 역학적 측면에서는 오히려 미립자 함유량의 증가에 따라 강도가 증가한

다고 하였으나, 응결시간 등의 특성을 고려하여 미립자 함유량의 허용범위를 7% 이내로 하는 것이 적절하다고 하였다. 또한 입형지수를 판정방법으로 부순돌과는 달리 체가름, 실적률 및 투수시험에 의한 방법으로 검토한 결과, 2.5~1.2mm의 입도의 모래를 대상으로 입형판정 실적률을 도입하여 1979년 콘크리트용 부순모래에 대한 품질규격에 대한 JIS 5004를 제정하였다. 그러나 당시 부순모래를 생산하는 기계나 미립자의 관리가 제대로 이루어지지 않고, 원석종류별 미립자의 입형의 변화가 커 단위수량은 증가되고, 건조수축 및 균열을 유발시켜 허용범위에 관한 문제가 제기되었으며 JIS A 5308 레드믹스트 콘크리트에서는 규정품목으로는 인정받지 못하였다. 이에 따라 일본건축학회를 중심으로 콘크리트에 요구되는 성능을 만족하는 새로운 허용범위 규정에 따른 검토가 지역별 골재를 대상으로 실시되었으며, 미립자의 허용범위를 5%와 7%로 등급을 설정하여 사용하도록 하였다. 그리고 부순모래의 입형을 개선하기 위한 다른 골재와 혼합하여 사용하는 방법들이 검토되었고, 혼합모래를 사용함에 따라 단위수량의 증가 없이 유동성을 효과적으로 확보하며, 건조수축 및 블리딩 등의 물성을 만족시키는 것으로 나타났다. 또한 부순모래의 미립자를 효과적으로 제어하는 분급장치나 입형개선에 효과적인 각종 분쇄기의 발달로 혼합사용보다는 부순모래만 사용하는 연구가 상대적으로 많이 진행되고 있다. 부순모래 미립자의 입형변화에 따른 콘크리트의 배합을 검토한 결과, 미립자 함유량의 증가는 굵은 골재 용적을 높이고, s/a(잔골재율)를 감소시켜야 하며, 입형이 거칠수록 3~4% 정도의 미립자를 함유하는 것은 콘크리트의 작업성을 증진시킬 수 있다고 하였다.

## 1.2.2 국내 연구동향

부순모래를 사용한 콘크리트의 규격은 KS F 2558 콘크리트용 부순모래로 1983년에 제정되었으며, 양질의 천연골재를 쉽게 구할수 있던 당시 부순모래의 사용 거의 없었다. 하지만 1980년대 말 천연자원의 대량 채취에 따른 고갈로 인해 대체골재의 개발이 요구 됨에 따라 산업부산물로 취급되던 부순모래는 1990년대 초 석산 개발업체를 중심으로 관심을 가지기 시작하였다.

실질적인 연구는 강모래와 강자갈, 강모래와 쇄석 콘크리트 및 쇄석 콘크리트와 부순모래의 성상을 소개하였던 최영화(1988)의 쇄석 콘크리트의 성상에 관한 연구에서 시작되었는데, 쇄석과 부순모래를 사용하는 콘크리트의 배합표를 제시하는 등 부순모래를 사용한 콘크리트의 전반적인 자료를 제공하였다.

현재의 부순모래와는 약간 성격이 다르지만 한천구(1991)는 충북지역 광산폐석의 콘크리트 골재에 관한 연구에서 폐석을 부순모래로 사용할 경우에 대한 평가를 고찰하였다. 정부의 건설사업이 마무리되던 시기인 1993년 대한주택공사는 부순모래를 실용화하기 위해 부순모래 시방규준, 잔골재 현황 및 생산설비 등에 대하여 조사하고, 국내 부순모래의 원석종류에 대한 특성을 분석하고 품질관리 및 활용방안을 제시하였다.

한천구(1995)의 부순모래 콘크리트의 개발에 관한 연구에서는 쇄석 및 부순모래를 사용한 배합설계법을 제시하였고, 레미콘 생산에 응용토록 하였다. 그 후, 1997년에 마무리된 부순모래 콘크리트의 물성조사 및 실용화 방안에 관한 연구에서 부순모래의 미립자 함유량이 증가함에 따라 작업성 저하와 강도증가 효과를 보고하였고, 부순모래와 다른 모래가 혼합된 콘크리트의 배합설계법을 제시하였다. 1996년에 대한주택공사는 부순모래를 대체골재로 활용하기 위해 표건상태 판정방법을 파악하고, 미립자의 함유량에 따른 함수율의 변화를 검토하였고 Speedy Moisture Tester를 제안하였다. 그러나 본 연구와 같이 부순모래를 대상으로 미립자량과 고성능 AE감수제를 이용한 슬럼프, 공기량, 압축강도 뿐 아니라 동결융해에 대한 저항성, 길이변화율, 표면박리시험 등에 대한 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 부순모래의 미립자 함유량과 고성능 AE감수제 사용량이 콘크리트 성능에 미치는 영향을 평가하였으며, 파일럿 규모 공시체 실험을 통해 현장 적용성을 검토하였다.

### 1.3 연구내용 및 방법

우리나라는 1970년대부터 대규모 공사로 인한 천연자원의 무분별한 채취로 자원이 고갈되고 있다. 하지만 콘크리트의 물량은 계속 증가하는 반면 천연자원의 품귀현상으로 자재확보가 어려워 대체 골재로서 부순모래를 사용하는 방안이 가장 현실적이다.

부순모래는 생산과정에서 미립자가 많이 발생한다. 또한 생산공장, 산지, 원석의 질에 따라서 미립자 함유량이 많고 적음의 편차가 심하여, 그에 따라 조립률 편차가 심해지며, 부순모래의 품질의 변동이 콘크리트 성능에 영향을 미친다. 이러한 영향으로는 단위수량이 증가하며 S/a(잔골재율)가 커지고, 워커빌리티가 나빠지며 내구성에 나쁜 영향을 미친다. 그러므로 본 연구에서는 고성능 AE감수제를 사용한 부순모래 미립자의 함유량이 많고 적음에 따라 콘크리트에 미치는 영향에 대해 연구를 시작하였다. 이를 위해 인위적으로 체가름을 실시한 부순모래에서 미립자 함유량을 22%, 15%, 7%, 2%, 0%로 조정하여 배합조건을 달리 설정하였고, 22%의 미립자 함유량에 고성능 AE감수제를 사용량을 0.70%, 0.85%, 1.00%을 달리 조정하여 콘크리트 내구성에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

본 연구를 실시한 내용 및 실험방법은 다음과 같이 요약할 수 있다.

#### 1. 배합조건

동일한 W/C(물-시멘트비), S/a(잔골재율), 굵은골재 투입량, 잔골재 투입량, 시멘트 투입량을 기반으로 하여, 배합조건을 설정하였다.

##### 1) 미립자 함유량에 따른 영향

- 미립자 함유량(22%, 15%, 7%, 2%, 0%), 혼화제 사용량(0.70%)

##### 2) 혼화제에 따른 영향

- 미립자 함유량(22%), 혼화제(0.70%, 0.85%, 1.00%)

#### 2. 표준 공시체 실험

##### 1) 굳지 않은 콘크리트 실험

콘크리트의 작업성을 검토하기 위해 배합조건에 따른 슬럼프와 공기량 실험을 실시하였고, 미립자 함유량과 혼화제 사용량에 따른 영향을 검토하고자 하였다.

## 2) 경화한 콘크리트 실험

배합조건에 따른 압축강도(3일, 7일, 28일) 실험 7 가지 배합, 길이변화율(1주, 4주, 8주, 3개월) 실험 6 가지 배합, 동결융해에 대한 저항성 6 가지 배합, 표면박리 실험 6 가지 배합을 실시하였고, 미립자 함유량과 혼화제 사용량에 따라 콘크리트 성능에 미치는 영향을 확인하고자 하였다.

## 3. 파일럿 규모 공시체 실험

표준 공시체 실험을 통한 결과를 바탕으로 레미콘 회사 호퍼에서 골재를 채취 후 체가름 입도분석 시험을 실시하여 혼화제의 사용량(0.70%, 0.85%, 1.00%)를 조정하였다. 이를 통해 현장 적용 가능성에 대한 확인을 하고자 하였으며, 슬럼프, 공기량 실험, 압축강도(3일, 7일, 28일) 시험, 동결융해에 대한 저항성의 실험을 통해 현장 적용성에 대한 평가를 수행 하였다.

또한 본 논문은 총 5장으로 다음과 같이 구성되었다.

제 1 장에서는 ‘연구배경 및 목적’으로 잔골재 중 부순모래의 미립자에 대한 연구의 필요성과 연구동향에 대해 기술하였다.

제 2 장에서는 ‘콘크리트 재료의 특성’으로 본 연구에서 사용한 부순모래 및 혼화제의 재료의 특성을 기술하였다. 특히, 본 연구에서 미립자 함유량에 따른 압축강도, 동결융해에 대한 저항성, 길이 변화율, 표면박리에 대한 이론적 내용을 기술하였다.

제 3 장은 ‘실험방법’에 대한 내용으로 본 연구에서 실시한 시험규격과 방법에 대해 설명 뿐 아니라 시험을 위한 공시체의 준비 및 제작과정 등에 대해 기술하였다.

제 4 장은 ‘실험 결과 분석’으로 각 실험에 대한 결과를 분석하여 기술하였다. 실험은 3장의 실험방법과 같이 슬럼프, 공기량, 압축강도, 길이변화율, 동결융해에 대한 저항성, 표면박리 실험이다.

제 5 장은 ‘결론’으로 본 연구에 대한 종합적인 내용을 기술하였다.

## 제 2 장 콘크리트 재료의 특성

### 2.1 부순 모래

#### 2.1.1 부순모래의 관련기준 및 국내의 사용현황

부순모래 콘크리트에 관한 연구는 외국에서 이미 오래전부터 수행되어왔다. 특히 모래수급에 어려움이 있는 미국, 유럽, 일본 등과 같은 나라에서는 이미 콘크리트 잔골재로서 부순모래가 많이 사용되고 있으며 규정도 제정되었다. 미국의 쇄석협회 NCSA(National Crushed Stone Association) 중심으로 콘크리트용 대체 잔골재인 부순모래 연구를 진행하였으며, 부순모래의 품질규격에 대한 규정은 정하지 않고 강모래의 품질규격에 포함시키며, 부분적으로 강모래와 품질규격을 달리 하고 있다. 일본은 JIS A 5004를 바탕으로 콘크리트 대체 잔골재인 부순모래의 품질규격이 규정되었고, 레디믹스트 콘크리트에서도 부순모래가 지정품목으로 인정되어 1993년 부순골재의 통합적인 관리를 위해 JIS A 5005 콘크리트용 쇄석 및 쇄사로 개정하였다. 국내도 마찬가지로 일본의 JIS A 5005를 바탕으로 하여 KS F 2527에 부순골재의 규격을 정하고 있다.

국토교통부(2012)에서 조사한 레미콘 제조에 사용된 골재의 품종별 소비실태를 통계해보면 그림 2.1, 2.2와 같다. 그림 2.1에서 굵은골재 사용비율은 1990년에는 부순자갈이 79.9%를 차지하였으나, 2002년에는 94.7%로 대부분을 차지하고 있다. 반면에 강자갈은 1990년에는 18.4%를 차지하였으나, 2002년에는 2.3%로 소비량이 낮아지는 추세를 보이고 있다. 최근 천연골재의 채취 규제 강화 및 부존량이 감소되면서 육자갈의 소비량은 2.3%를 차지하고 있다. 또한 굵은골재와 잔골재, 골재원별 사용량의 변화를 살펴보면 1997년 레미콘용 굵은골재의 경우 부순자갈 의존도가 86.1%에도 불구하고, 그림 2.2에서와 같이 부순모래의 소비량은 7.7%에 그치고 있다. 잔골재 중 골재원별 소비형태는 1990년도에는 강모래가 76.1%를 차지하였으나, 2002년에는 21.6%로 급격히 하락하였다. 반면, 1990년대 바다모래는 15.9% 정도였으나 2002년에는 50.9% 정도로 차지하여 소비량이 증가함을 알 수 있다. 이는 1980년대 이후 건설수요의 증가로 인하여 천연자원인 강모래, 바다모래가 고갈되었고, 환경 보호 정책으로 인하여 채취 규제가 심해졌기 때문이다.

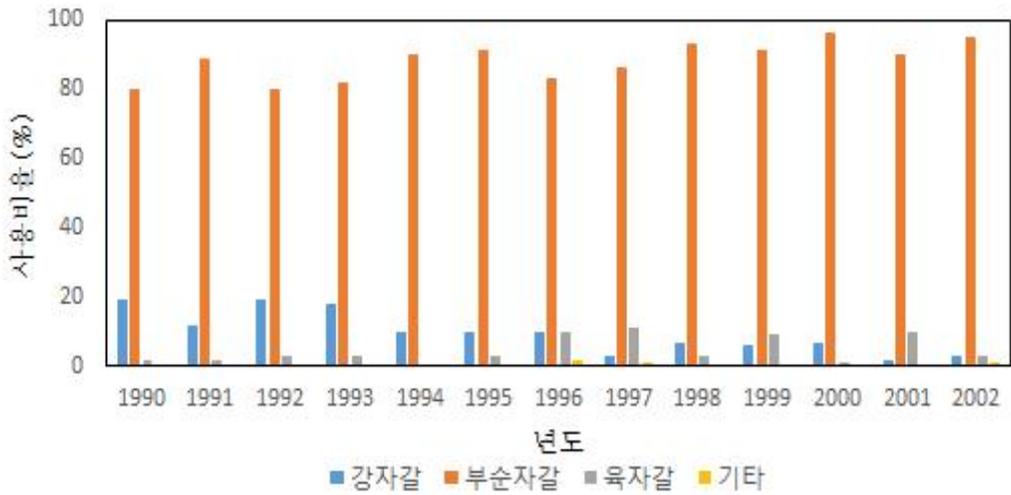


그림 2.1 레미콘용 굵은골재의 품종별 소비형태(국토교통부, 2012)

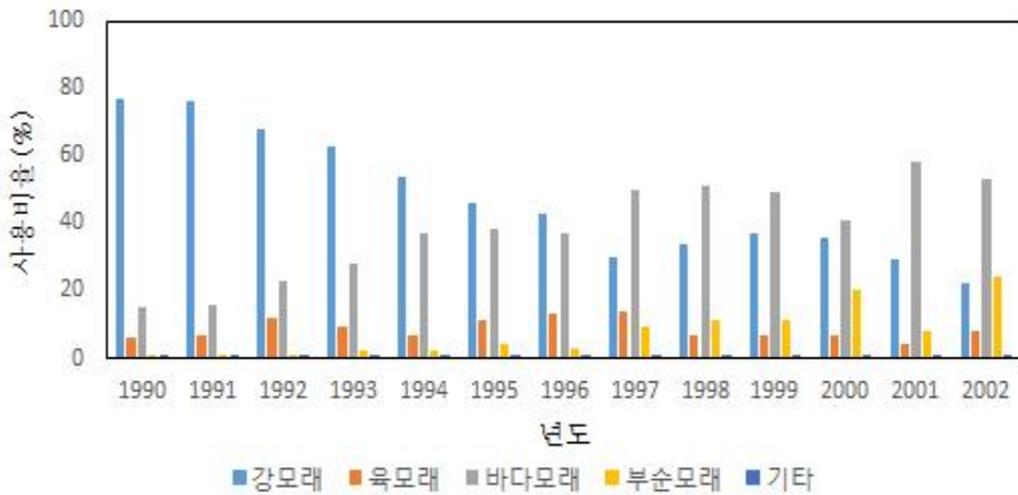


그림 2.2 레미콘용 잔골재의 품종별 소비형태(국토교통부, 2012)

그림 2.3은 국토교통부(2012)에서 조사한 결과로 국내의 각 지역별 레미콘 회사에서 실제로 사용되고 있는 부순모래의 사용현황을 나타낸 것이다. 전국의 레미콘 회사를 대상으로 조사를 하였고, 설문에 참여한 회사 가운데 부순모래를 사용하고 있는 회사는 48.6% 였으며, 44.8%는 부순모래를 사용하지 않는 것으로 나타났다. 또한 나머지 7.1%의 회사는 유동적으로 사용한다고 조사되었다.

특히 강모래의 입도 작거나 입자가 매우 가는 등의 문제로 부산·경남 지역 레미콘 회사의 경우는 75.6%가 부순모래를 사용하는 것으로 조사되었으며, 다른 지역의 경우도 천연골재의 고갈, 채취규제 및 골재의 품질저하로 인하여 부순모래의 사용비율이 점차 증가할 것으로 예상된다.

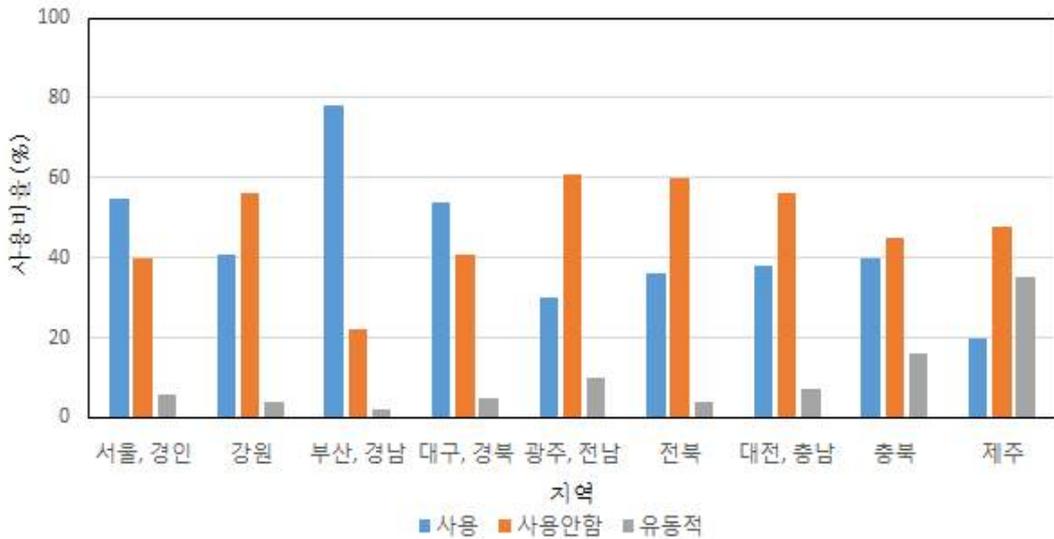


그림 2.3 각 지역별 레미콘사의 부순모래 사용현황(국토교통부, 2012)

## 2.1.2 부순모래의 특성

### 1) 입도 및 조립률

입도 및 조립률은 콘크리트의 작업성, 경제성 및 경화한 콘크리트의 강도·내구성에 중요한 영향을 미치는 요소로, 입도가 좋으면 입형판정 실적율이 증가하므로, 콘크리트의 밀도, 마모저항성, 수밀성, 내구성 등이 증대하고, 적은 단위시멘트량으로 소요강도의 콘크리트를 제조할 수 있으며, 단위시멘트량의 감소로 건조수축 및 수화열을 감소시켜 균열을 감소시킬 수 있다.

그리고 미립자 함유량이 많아지면 콘크리트는 유동성이 증가하는 경향을 보이며, 0.15mm 또는 0.3~0.15mm의 입자는 콘크리트의 작업성, 펴핑성, 유동성에 많은 영향을 미치며, 0.6~0.3mm의 입자는 공기연행성에 영향을 미친다. 따라서 모래의 입도와 조립률을 조정하여 콘크리트 품질은 향상시킬 수 있지만, 천연골재의 경우 채취지역마다 입도의 변화가 크게 달라지며, 입도조정이 거의 불가능하다. 그러나 부순모래의 경우 인위적으로 제조하는 특성상 입자의 크기 및 양을 조절할 수 있으며 입도조정이 용이하고, 일정한 입도분포의 모래를 공급할 수 있으며, 콘크리트의 품질은 향상되는 장점이 있다.

### 2) 입형

골재에서 입형은 콘크리트의 유동성, 충전성 또는 작업성에 영향을 미치는 요소이다. 입형이 불량하면 콘크리트는 작업성이 저하되며, 필요한 작업성을 얻기 위해 단위수량을 증가시켜야한다. 입형이 모날수록 골재는 마찰이 생기며, 입도조건이 동일한 경우 콘크리트의 유동성 및 충전성을 저하시킨다. 따라서 입형이 둥근모양에 가까울수록 콘크리트의 유동성 및 충전성은 증가하고, 그로 인해 콘크리트의 특성이 증대한다. 천연모래에 비해 부순모래는 입형이 모나고 표면의 요철이 크며, 콘크리트용 잔골재로 사용하려면 입자모양판정 실적률이 53% 이상인 것을 사용하도록 규정되어 있으나 원석의 종류, 분쇄설비 및 생산공정을 정확히 검토하여 생산할 경우 KS규격에만족하는 품질의 모래생산이 가능하고, 품질향상에 대한 의지에 따라 천연모래와 비슷한 입형을 갖는 모래도 생산할 수 있다.

주택공사연구소와 삼표산업이 실시한 부순모래에 대한 연구결과에 의하면 “입형판정 실적률이 2% 증가함에 따라 콘크리트의 슬럼프가 9.7~33.6% 증가하고, 부순모래를

단독으로 사용하여도 천연모래와 거의 동등한 수준의 품질특성을 갖는다.”고 보고되었다.

### 3) 미립자

콘크리트 표준 시방서(2016)에서 명시된 골재중의 미립자는 0.15mm를 통과한 입자로서 콘크리트의 단위 수량을 증가시키고 강도와 내구성을 저하시킨다. 또한 미립자 함유량이 증가할수록 콘크리트의 공기량은 감소되어 작업성이 떨어지고 응결시간이 단축되어 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그러나 부순모래의 미립자는 천연사의 토분과는 달리 미립자의 효과에 의해 콘크리트의 강도가 증가한다. 그리고 콘크리트에 미립자 함유량이 3~5% 정도일 경우 블리딩이 감소되며 적정수준의 점성을 가지게 되어 콘크리트의 재료분리를 저하시킬 수 있지만, 미립자의 함유량이 1% 이상일 경우 작업성에 필요한 단위수량은 급격하게 증가하며, 2~3% 이하에서는 콘크리트에 블리딩이 발생하여 콘크리트의 재료분리가 일어날 수 있으며, 표면이 거칠어져 충전성을 감소시킨다. 콘크리트의 균열발생에 대한 미립자 함유량은 부순모래의 암질과 생산방법에 따라 달라지며, 재령 24시간에서 균열폭, 균열길이는 미립자 함유량이 증가함에 따라 커지는 경향을 보이거나, KS에서 규정하는 미립자 함유량이 7% 이내인 부순모래를 사용할 경우 초기균열에는 특별한 이상이 없다.

### 4) 강도 및 비중

골재의 강도와 비중은 밀접한 관계가 있으며, 일반적으로 비중이 높아지면 암석의 조직이 조밀해지며 강도는 증가한다. 또한 마모감량이 감소하는 경향이 나타낸다. 암석의 결정을 이루는 알맹이가 커질 경우 조직은 느슨하고 강도는 저하될 뿐만 아니라 비중도 감소하는 경향을 나타낸다. 콘크리트용 보통골재는 약 2.5~2.7정도의 비중값을 가지며, 콘크리트용 골재로써 2.5이상의 비중값을 가질 경우 강도나 마모감량면에서 만족할 수 있는 품질특성을 갖는다. 콘크리트용 골재의 비중이 증가하면 중량, 내구성 및 강성은 증가하며, 동결융해에 대한 저항성은 향상된다.

### 2.1.3 부순모래를 사용한 콘크리트의 성질

#### 1) 미립자의 영향

천연모래 내에 불순물이 포함되어 있으면 불순물은 제거하고 사용하여야 한다. 매우 작은 양의 불순물도 필요한 배합수의 양을 크게 증가시켜 콘크리트의 내구성을 감소시킬 수 있기 때문이다(Forster, 1994). 하지만 부순모래 미립자의 경우는 천연모래의 불순물과는 차이가 있다. 부순모래의 미립자는 콘크리트의 파괴 효과를 나타나지 않은 범위 내에서 일반적으로 많은 양이 포함되어 있을 수 있다(Mc Keagney, 1995).

부순모래의 미립자는 체 0.15mm를 통과하는 것으로 최대 미립자 함유량은 각종 규정에 의해서 제한된다. 예를 들어 ASTM C 33에는 0.15mm 통과량은 최대 10%로 제한되었으며, 우수한 표면마감성을 위해 충분한 미립자를 요구하는 콘크리트 또는 연행 공기가 없는 콘크리트에서는 미립자 함유량을 최소량으로 제한하고 있다. 침니 또는 점토와 같은 0.08mm 보다 작은 미립자는 보통 큰 골재에 붙어 있으므로 골재의 씻는 정도에 결정된다. 0.08mm 통과량은 천연모래에서 마모에 제안된 경우 3%로 규정되며 이를 제외하고는 ASTM C33에서는 5%로 규정되었다. 암석먼지가 마모에 의해서 발생한다고 보면 0.08mm를 통과하는 부순모래 미립자의 최대 함유량은 7%까지 사용가능하다. NCDT의 구조물 및 도로를 위한 2MS의 기준에는 0.08mm를 통과하는 미립자를 최대 8%까지 사용할 수 있다고 하였다.

부순모래는 천연모래와 달리 골재의 세척을 통하여 불순물을 제거하여야 한다. 하지만 골재 산업에서 실시한 연구 바탕으로 많은 양의 암석먼지가 콘크리트에 사용되는 것은 문제가 없다고 하였다. 또한 미립자가 진흙과 미세 모래와 같은 활성재료가 아닌 부순재료 또는 암석먼지라면 규정된 양보다 많은 양을 사용할 수 있다. 그러나 미립자의 적용 가능성은 일반적으로 미립자의 강도를 기본으로 결정된다. 콘크리트의 거동은 부순모래 내의 미립자가 결정하지 않으며 여러 장점을 지니고 있다고 하였다. 모래에 포함되어 있는 분류되어진 많은 양의 미립자는 콘크리트를 밀실화 시키고 투수저항성을 증가시키며, 부순모래 내의 미립자는 윤활재로서 작용을 하여 입자가 둥근 형태를 하고 있다면 마감성을 증가 시킨다고 하였다(Hudson, 1997).

암석먼지의 비표면적이 자연모래보다 크기 때문에 동일한 워커빌리티를 유지하기 위하여 보다 많은 양의 시멘트가 필요하지만 강도는 거의 자연모래와 비슷하다고 하였다(Nagaraj, 1998). 공기량과 슬럼프는 암석먼지가 증가할수록 감소하며, 암석먼지의 양

이 10%까지는 강도에 영향을 주지 않고, 충격저항성은 미립자 함유량이 5%까지는 영향이 없었다고 하였으며, 필러로서 암석먼지의 함유량이 15%까지는 경화된 콘크리트의 수분흡수율을 감소시킨다고 하였다(Celik와 Marar, 1996).

Kronlof(1994)는 고유동화 콘크리트에서 미립자가 갖는 장점을 연구하였고, Ghosh와 Sethi(1970)는 부순모래는 조립률의 범위가 1.8~2.5일 때 콘크리트에 사용하기가 적당하다고 하였다. 그림 2.4과 같이 Kono(1980)의 연구결과에서 나타난 동일한 슬럼프 값을 만족하기 위해서는 부순모래를 사용하면 강모래 경우 보다 단위수량은 훨씬 많이 요구된다. 이는 잔골재중 미립자 함유량이 많을 경우 표면적 증가에 의한 슬럼프 값을 동일하게 얻기 위해 단위수량은 더 많이 필요하지만 부순모래의 경우 미립자 함유량의 증가로 인해 단위수량 증가율이 강모래 보다 낮은 것을 확인하였다.

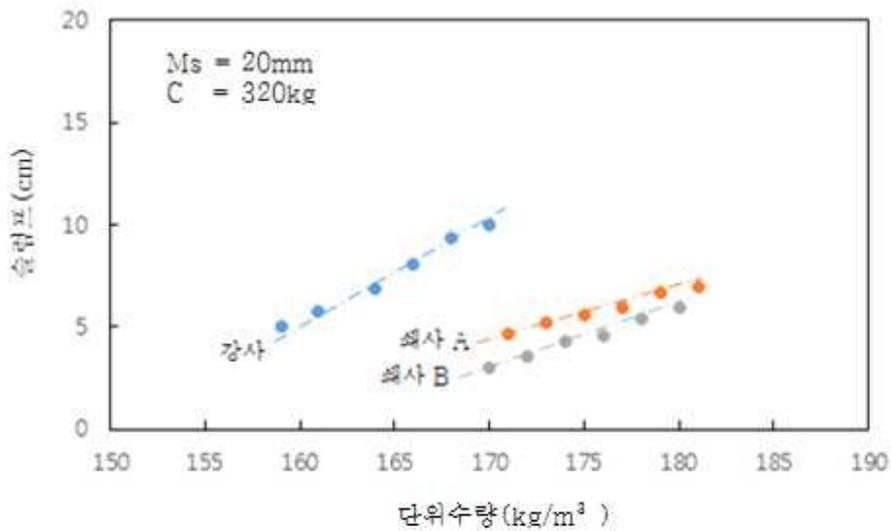


그림 2.4 단위수량과 슬럼프(Kono, 1980)

## 2) 입자 모양의 영향

일반적으로 부순모래의 입자 모양은 매우 거칠고 모난 형상을 갖고 있다. 따라서 입형에 영향을 받는 콘크리트를 연구하기 위한 미국 NCSA에서는 공극량의 정도를 통하여 입형지수(shape index)를 도입하여 입형의 거칠기를 판단하였다. 이에 따르면 잔골재의 입형지수가 53.4% 이하인 경우에는 불량한 입자 모양에 의하여 굳지 않은 콘크리트의 특성이 크게 좌우되지 않는 것으로 알려져 있으나 동일한 작업성을 목표로 배합시험을 하였을 경우 입형지수가 클수록 요구되는 단위수량이 많아지는 경향을 볼 수 있었으며, 그림 2.5에서와 같이 석분의 모양 종류에 따라서도 단위수량 저감효과가 상이한 것으로 보고하였다(Miyazaki, 1982).

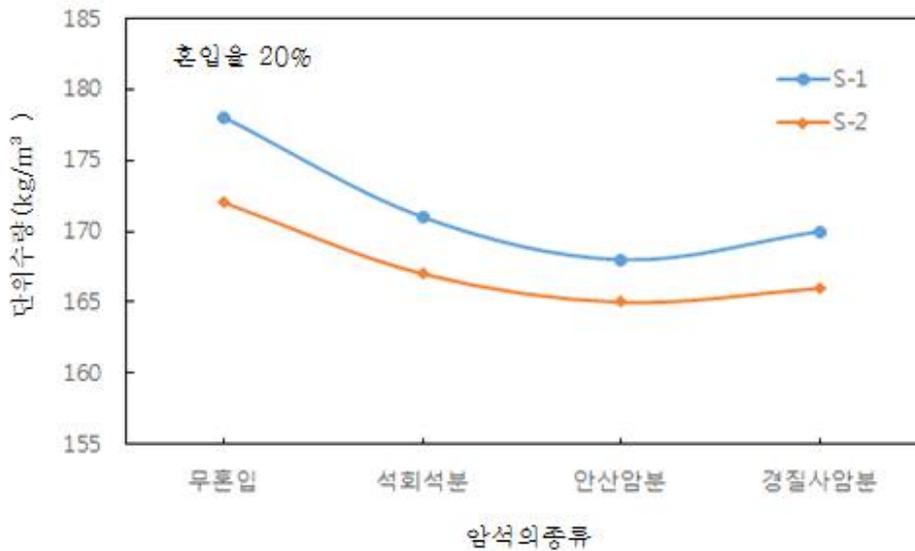


그림 2.5 석분의 종류와 단위수량(Miyazaki, 1982)

### 3) 잔골재의 영향

Tazawa(1994)는 입형이 좋은 부순모래, 입형이 불량한 부순모래를 잔골재로 사용한 콘크리트에 대하여 각종 실험을 수행하였다. 부순모래와 바다모래의 잔골재의 혼합비를 동일하게 사용하여 작업성을 비교하는 실험을 실시하였다. 부순모래와 바다모래를 혼합한 입형이 좋은 콘크리트는 동일한 단위수량의 천연모래 콘크리트와 비슷한 슬럼프값이 나타났으나, 부순모래 콘크리트보다는 유동성이 떨어졌다. 그러나 입형이 불량한 실험에서도 부순모래와 바다모래를 동일하게 하여 작업성을 비교하는 실험을 실시하였다. 입형이 불량할 경우에는 동일하게 혼합한 경우와 부순모래만을 사용한 경우는 거의 비슷하게 낮은 슬럼프 값을 나타내었다. 따라서 잔골재의 혼합비는 부순모래는 입형의 성질에 따라 유동성에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

입자의 모양과 표면특성은 모래의 공극량과 마찰특성에 영향을 미치며 이를 사용한 콘크리트에도 영향을 미친다고 하였으며, 입방체 입자의 사용은 콘크리트의 품질에 영향을 미치지 않고 요구수량을 감소시키는 반면에 워커빌리티는 증가되며 낮은 공극 함유량에서는 매우 작은 입자가 공극을 채우기 위해서 필요하다고 하였으며, 필요한 워커빌리티와 유동성을 만족시키기 위하여 추가적으로 미립자가 필요하며 유동성을 위하여 필요한 미립자의 체적의 범위는 입자의 거칠기와 마찰특성의 인자로 표현할 수 있다고 하였다(Hudson, 1995).

### 4) 강도 특성

입형 판정 실적률은 공극량을 통하여 거친 정도를 판단하는 것이며 이는 53% 이상의 입형 판정 실적률인 경우 입형이 콘크리트의 강도에 영향을 주고 있지는 않으나, 이에 해당하는 부순모래를 사용할 경우 내하력 또는 내구성에 악영향을 미치는 것으로 나타나고 있다. 즉, 작업성을 동일하게 하여 배합시험을 했을 경우 입형 판정 실적률이 작을수록 동일한 단위수량 하에서 강도저하가 나타난다.

연구자들에 의하면 기존 수행된 결과를 따르면 동일한 W/C(물-시멘트비)의 경우 부순모래는 강모래를 사용한 콘크리트에 비해 불량한 작업성을 보이나, 최근 천연골재를 사용한 콘크리트의 품질 악화에 따라 부순모래를 사용한 콘크리트의 작업성은 상대적으로 양호한 추세를 보이기도 하였다. 또한 천연골재를 사용한 콘크리트와 강도 발현에 있어서는 동등한 결과를 나타냈다.

석분의 종류에 따른 압축강도 특성에 대한 연구결과에 따르면 그림 2.6에서 알 수

있듯이 20%의 혼입을 조건에서 석분의 종류에 따라 압축강도가 상이하며 석회석분 및 안산암석분의 경우가 경질사암 및 무혼입의 경우보다 크다고 나타났으며, 동일한 단위 시멘트량으로 배합하였을 경우, 입형 판정 실적률이 높은 부순모래를 사용한 콘크리트의 경우에는 시멘트 효율이 높고 입자 모양이 불량한 부순모래 콘크리트는 시멘트 효율이 감소하지만, 동일한 배합으로 제조된 강모래 콘크리트에 비하여 낮은 강도를 나타내지는 않는다(Miyazaki, 1982).

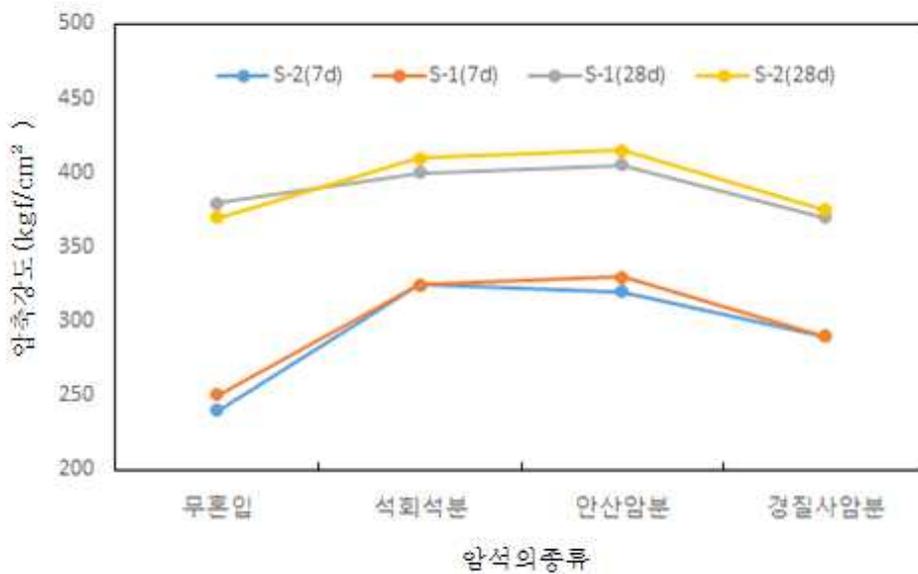


그림 2.6 석분의 종류와 압축강도(Miyazaki, 1982)

### 5) 건조 수축

물-시멘트 비 45%에서 잔골재의 종류 및 시멘트 종류에 따른 재령 1년에서의 건조 수축결과인 그림 2.7에 따르면 쇄사가 건조수축율이 가장 크며, 혼합사, 해사의 순으로 건조수축율이 작아지는 것으로 보고하였으며, 시멘트 종류에 따른 영향은 그림 2.8과 같이 플라이애시 B 종의 경우가 가장 크고 그 다음이 중용열 포틀랜드 시멘트였으며 중용열 플라이애시의 경우가 가장 작은 값을 나타내었다(Yamato, 1997).

한편, 입형 영향에 따른 장기 거동의 연구결과를 살펴보면 입형 판정 실적률의 저하에 의한 단위수량은 증가하고 그에 따라 건조수축량이 증가하는 것으로 나타났으며,

천연모래와 국내에서 생산되는 부순모래를 적절하게 혼합한 혼합모래의 경우 미립자 함유량을 조절하여 건조수축량을 제어할 수 있는 것으로 나타난다.

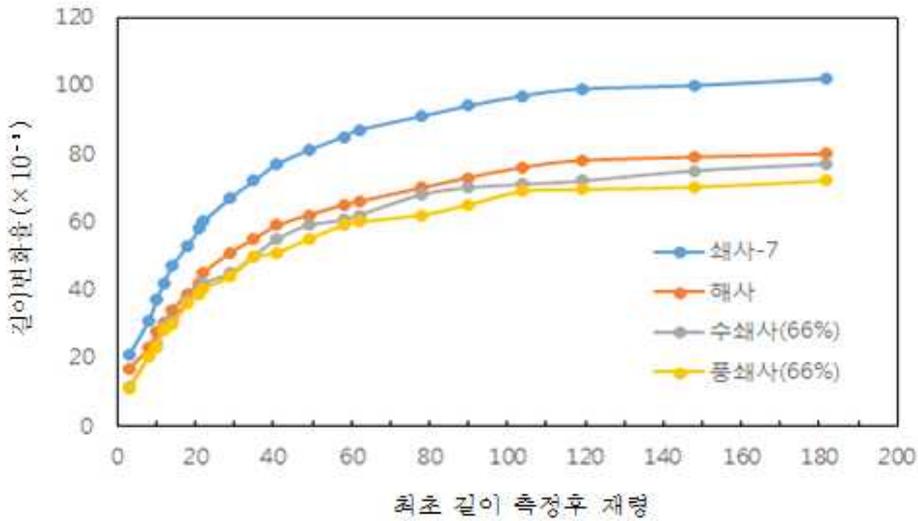


그림 2.7 재령과 길이변화율의 관계(Yamato, 1997)

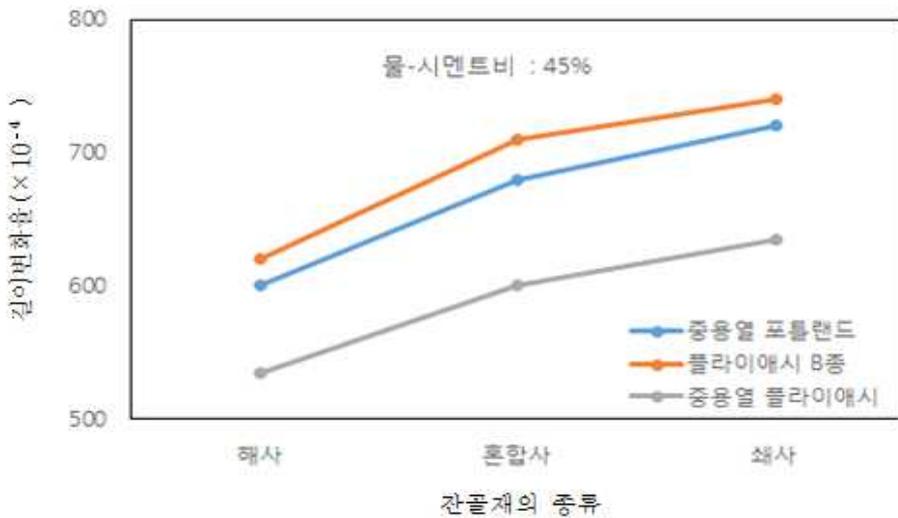


그림 2.8 재령 1년에서의 건조수축(Yamato, 1997)

## 6) 동결융해 저항성

콘크리트의 동해는 두 가지 시험방법을 사용하여 측정할 수 있는데 그 두 가지 방법은 동결융해 저항성 및 표면박리 저항성 시험이며, ASTM C666(AASHTO T161-86)에서는 수분이 존재하는 콘크리트의 급속 동결융해 시험방법을 제시하고 있다.

동해는 동결 과정에서 수분의 팽창에 의한 수리학적 메카니즘에서 발생하며 동해에 저항하는 내구성은 주로 공극시스템의해 결정된다. ASTM C666에서는 급속 동결융해반복시험을 바탕으로 동해 내구성을 가지는 골재를 사용하여 공극시스템의 효과를 측정할 수 있다.

ASTM C672의 콘크리트 표면박리 저항성 시험은 공극시스템에 영향을 받지만 또한 다른 영향인자 중에서 표면 마감성 효과와 표면특성에 민감하게 반응하며, 이와 같은 방법은 용빙제가 존재하는 장소에서 보다 현실적인 시험방법이며 교면포장에서 동해저항성 시험으로 적절하다고 할 수 있는 반면에 표면박리 시험의 한가지 어려운 문제점은 상태판정기준을 육안관찰과 제한된 양적평가로 결정한다는 것이다(Pigeon and Pleau, 1995).

W/C(물-시멘트비)가 높은 부순모래 콘크리트의 동해 내구성을 규정되지않은 동결융해반복시험을 실시하여 조사하였으며, 공극량 같은 골재 특성은 포함하지 않았다. 부순모래의 입경에서는 0.15mm 통과율을 단지 5%만 허락하여 현재 기준보다 미립자 함유량을 낮게 제한하였고, 연구결과는 동결융해 내구성은 조립율 및 물시멘트비가 증가할수록 감소하였고, 일반적으로 조립율이 크면 미립자 함유량의 작아진다(Goldbeck, 1938).

ASTM C666의 급속 동결융해반복시험을 이용하여 서로 다른 W/C(물-시멘트비)를 가진 배합에서 시험을 실시한 결과 높은 W/C(물-시멘트비)를 가진 배합과 빈약한배합에서 동결융해저항성이 매우 낮음을 알 수 있었고, 동결융해저항성은 특별히 입경의 변화에 영향을 받지 않았는데 이는 급속 동결융해시험방법이 주로 공극시스템에 영향을 받은 반면에 인장강도는 민감한 반응을 하였으며, 요구단위수량과 미립자 함유량이 부순모래의 표면박리 내구성과 관계된 특성에 미치는 영향은 아직까지는 충분히 연구되지 않았다(Nichols, 1982).

부순 모래는 생산과정에서 암석을 부수는 작업을 하기 때문에 미립자 함유량과 입형이 모난 골재의 함유량이 높다. 이러한 특성은 역학적 특성 및 단위수량에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있지만 현재 부순모래를 사용한 콘크리트에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 특히 부순모래의 특성 및 동결융해에 대한 저항성에 대한 연구는 거

의 전무한 실정으로 연구가 지속적으로 이루어져야 한다. 또한 부순모래의 모난 입형 및 미립자 함유량에 따른 재료분리에 대한 상관관계와 요구되는 단위수량의 연구와 표면박리 저항성에 영향을 주는 인자에 대한 연구는 더 많이 필요하다.

## 2.2 화학혼화제

콘크리트용 혼화제의 사용은 콘크리트 기술이 발전하면서 다양한 종류 혼화제가 이용되고 있다. 최근 건설 공사 및 콘크리트 제품에는 혼화제 없이 공사가 이루어지는 것은 단 1건도 없다고 해도 과언이 아니다. 혼화제는 콘크리트에서 물리화학적 작용에 의해 콘크리트 성질을 개선시켜 품질을 우수하게 하며, 경제성 향상의 목적으로 사용 되는 재료이다. 이러한 혼화제를 적절히 사용하면, 효과를 극대화시킬 수 있지만, 잘못 사용하면 오히려 콘크리트에 독약이 되는 성질을 갖고 있고 이것은 기존의 수많은 사용 실적에서도 명확히 밝혀져 있다. 따라서 혼화제의 선택 및 사용함에 있어서는 각각의 품질이나 효과를 충분히 파악한 후 적절히 현장 혹은 제품의 환경을 고려하여 사용해야만 한다.

### 2.2.1 화학혼화제의 정의 및 작용기구

혼화제는 대부분 표면 활성제에 속하며 표면 활성제는 그림 2.9와 같이 물에 녹기 어렵지만 기름에 녹기 쉬운 소수기와 기름에 녹기 어렵지만 물에 잘 녹는 친수기로 구성된다. 이 양쪽의 종류나 사용량에 따라 계면 활성제로서의 기포, 분산 작용이 정해진다.

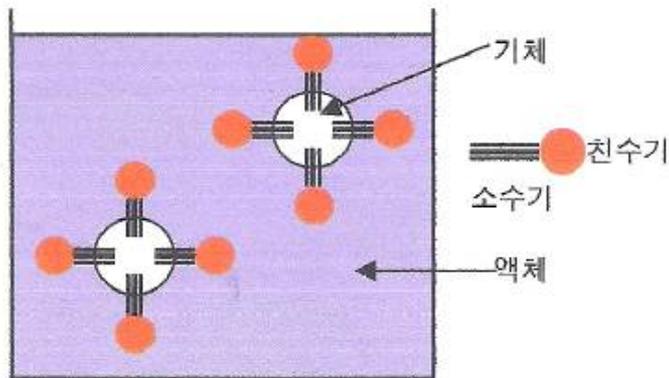


그림 2.9 계면 활성제의 기포 작용(삼표 시멘트)

1) 기포(발포)작용

표면활성제를 포함한 용액에 기계적인 수단을 가하여 공기를 혼입시키면 용액에 둘러 쌓인 기포가 생기며, 이 때 생기는 기포의 내부 쪽은 소수기, 용액 쪽은 친수기를 향하며 배열되는 흡착모가 순간적으로 생성되어 기포가 된다. 발생한 기포 가운데, 작은 기포는 미세한 기포가 되며, 큰 기포는 없어진다. 콘크리트는 기포가 안정되고 기포성이 뛰어난 것을 사용한다.

2) 분산 및 습윤 작용

그림 2.10과 같이 미세한 분체를 수중에 침투시키면 분체 입자 사이의 응집력은 분체의 표면을 적시는 힘보다 커지기 때문에 입자는 응집되고 분산되지 않는다. 이 수용액에 리그닌 설펜산을 첨가시키면 수중에서는 칼슘 양이온과 설펜산 음이온으로 이온화하여 강한 음이온 활성을 나타내며 응집 상태는 입자의 계면에 흡착하여 입자를 전기적으로 반발 분산시킨다. 응집상태인 시멘트 입자 간의 공기와 물을 방출시키기 때문에 시멘트는 유동성이 생기게 된다. 또한 표면 활성제를 포함한 액체는 물과 비교했을 때 표면 장력이 작아 침투성이 좋으며 이러한 액체는 시멘트 입자 표면을 적셔 물과 시멘트 입자를 충분히 접촉시켜 수화작용이 쉬워지게 된다.

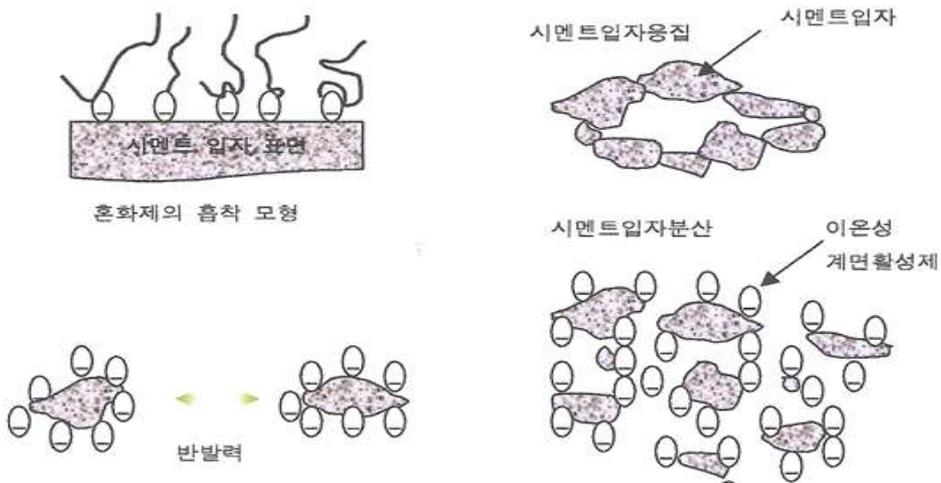


그림 2.10 계면활성제의 분산작용(상표 시멘트)

## 2.2.2 혼화제의 종류

### 1) AE제

AE제의 사용 목적 및 효과로는 굳지 않은 콘크리트의 작업성을 개량하여, 콘크리트의 시공성을 좋게하고, 동결 용해에 대한 저항성을 증가시키기 위해 사용된다. 또한 콘크리트의 공기량에 영향을 미치며 사용량, 재료 및 배합 조건 등에 의해 영향을 받는다. 표 2.1은 삼표 시멘트에서 명시한 AE제 사용량이 일정한 경우에 공기량이 감소하는 요인이다.

**표 2.1 공기량에 영향을 미치는 요인(삼표 시멘트)**

영향인자	연행공기량이 감소하는 경우
시멘트	단위 시멘트량 및 분말도가 증가하는 경우, 플라이애시의 미연소 카본이 많을 경우 등
골재	골재 형상이 편평할 때, 잔골재 중 0.15mm이하의 입자가 증가할 때, 잔골재의 조립율이 클 때, 잔골재율이 낮을 때, 굵은 골재 최대 치수가 클 경우 등
물	불순물이 많은 경우, pH가 낮을 경우
콘크리트	슬럼프가 현저히 작은 경우, 온도가 높은 경우 등
혼합(비비기)	믹서의 공칭 용량보다 작은 량 또는 큰 양을 비비기 때, 믹서의 능력이 저하된 경우 또는 비비기 시간이 길어졌을 경우 등
운반	수송 시간이 길어졌을 때, 펌프압송 압력과 거리가 클 경우 등

AE제의 사용상 주의점은 KS F 2560의 규격에 적절한 것을 사용하여야 하며, 사용량은 소량이므로 계량에 주의하여야 하며, 오차는 3% 이하이어야 한다. 또한 깨끗한 물에 희석하여 충분히 혼합시키고 공기량이 많아지면 콘크리트의 작업성은 좋아지나 강도가 저하 될 수 있으므로 사용량에 주의해야 한다. 그리고 운반 또는 진동 다짐에 의하여 공기량은 감소하여 비비기를 할 때 요구되는 공기량은 15~20% 정도 많아야 한다. 콘크리트의 내구성은 요구 공기량 외에 골재의 배합, 품질 등의 영향을 많이 미친다. 그러므로 사전에 충분한 시험을 실행하는 것이 좋다.

2) AE감수제 및 감수제

AE감수제 및 감수제의 사용 목적 및 효과로는 감수성분을 콘크리트에 사용하면 소량의 콘시스턴시를 얻기 위해 단위수량이 4~8% 감소하고, 작업성의 개선과 수밀성의 향상이 나타난다. AE감수제는 AE제의 연행 공기에 의한 감수 효과도 병행되어, 단위수량은 무침가보다 10~15% 정도까지 감소가 가능하며, AE감수제 및 감수제를 사용한 콘크리트의 주요 효과를 표 2.2와 같이 정리하였다.

**표 2.2 AE감수제 및 감수제의 주요 효과(삼표 시멘트)**

주요한 효과		계면활성제 종류	AE제	감수제			AE감수제		
				표준	지연	촉진	표준	지연	촉진
균 지 않 은 콘 크 리 트	단위수량의 감소		○	△	△	△	◎	◎	◎
	단위시멘트량 감소		-	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	공기연행성		◎	-	-	-	◎	◎	◎
	워커빌리티 개량		◎	○	○	○	◎	◎	◎
	블리딩 감소		◎	△	△	△	◎	◎	◎
	콘크리트의 응결 지연		-	-	◎	×	-	◎	×
	콘크리트의 응결 촉진		-	-	×	△	-	×	△
	펌프빌리티 개량		○	◎	◎	◎	○	○	○
휘니시빌리티 개량		○	○	○	○	○	○	○	
	슬럼프 저하 방지		-	○	◎	-	○	◎	-
경 화 콘 크 리 트	초기강도 증대		-	○	-	◎	○	-	◎
	수화열 감소		-	○	◎	×	○	◎	-
	수밀성 증대		○	○	○	○	◎	◎	◎
	중성에 대한 저항성 증대		○	○	○	○	◎	◎	◎
	동결융해작용 저항성 증대		◎	-	-	-	◎	◎	◎
	화학침식작용 저항성 증대		○	○	○	○	◎	◎	◎
	마찰, 마모 저항성		-	○	○	○	○	○	○

※ 주 : ◎ 효과 큼, ○ 효과 있음, △ 효과 적음, × 사용 불가, - 관계 없음

AE감수제 및 감수제의 사용상 주의점으로는 콘크리트의 사용 목적, 사용 조건을 충분히 검토하고, 콘크리트에 요구되는 품질 및 성능을 충분히 파악한다. 감수제, AE감수제에는 각각 표준형, 지연형 및 촉진형이 있고 각각의 특성을 충분히 파악한 후에 적절한 혼화제와 그 종류를 선택해야 한다. 감수제 및 AE감수제의 종류 및 사용량에서, 실제 콘크리트에 혼입되는 염화물 이온량 및 알칼리량을 계산하고, 그 외의 재료에서 혼입되는 염화물이온 및 알칼리량과 합산해서, 각각의 총량 규제치에 만족하고 있는 것을 확인할 필요가 있다. AE감수제 및 감수제를 과잉으로 첨가하면 콘크리트의 응결, 경화가 현저히 지연된다. 또한 AE감수제는 공기연행제와 함께 사용하기 때문에 공기량이 과다해서 강도 저하를 일으키는 경우도 있기 때문에 사용상 주의가 필요하다.

### 3) 고성능 AE감수제 및 고성능 감수제

표 2.3은 삼표시멘트에서 명시한 고성능 AE감수제 및 고성능 감수제의 사용 목적이다. 효과로는 고성능 AE감수제는 AE감수제에 비해 극히 감수율이 높고 슬럼프의 경시변화를 임의로 조절할 수 있으므로 고내구성, 고품질 콘크리트는 기존의 콘크리트와 동일한 방법으로 시공, 제조할 수 있다. 그리고 고강도 콘크리트의 슬럼프 로스 방지하여 장시간, 장거리 운반을 할 수 있다. 또한 일반 콘크리트의 단위수량을 저감하여 고강도 콘크리트 제조가 가능하다. 감수율은 플레인의 20% 정도가 감수 가능하므로 종래의 AE감수제의 1.5~2.0배 정도의 감수력이 있으며, 최근에는 감수 능력과 함께 분리 저감 기능을 갖는 혼화제도 개발되고 있다.

고성능 AE감수제 및 고성능 감수제의 사용상 주의점으로는 고성능 AE감수제는 단위수량 대책, 고내구성 콘크리트, 고강도 콘크리트, 고유동 콘크리트 등에 이용되지만, 주성분이 다른 고성능 AE감수제를 혼합하면 소요의 성능 발휘되지 않는 경우가 발생할 수 있기 때문에 혼합은 될 수 있는 한 피해야 한다. 단위수량이 작기 때문에 골재 표면수의 변동에 따라 슬럼프와 압축강도의 편차, 혼합 효율이 나빠지는 경우가 있다. 점성이 크기 때문에 펌프 압송성, 형틀에 걸리는 측압이 커지기 때문에 주의가 필요하다.

**표 2.3 각종 혼화제를 이용한 후레시 콘크리트의 특성(삼표시멘트)**

성 질	고성능 AE감수제 콘크리트	AE감수제 콘크리트	유동화 콘크리트
유동특성	사용량으로 슬럼프 조정가능	사용량으로 슬럼프 조정불가	사용량으로 슬럼프 증대량 조정 가능
슬럼프 경시변화	슬럼프 로스, 온도, 의존성 없음.	슬럼프 로스 보통, 온도, 의존성 있음.	슬럼프 로스 큼, 온도, 의존성 있음.
공기 연행성	혼화제의 종류에 따라 다르다	양호 혼합에 의해 약간감소	베이스 콘크리트에 연행
블리딩	AE감수제 콘크리트보다 적음	플레인 콘크리트보다 약간 적다(70%정도)	베이스 콘크리트와 같거나 약간 적다.
분리 저항성	AE감수제 콘크리트보다 약간 큼	플레인 콘크리트보다 약간 커짐	슬럼프 증대량이 큰 경우 분리되기 쉽다.
응결시간	AE감수제 콘크리트보다 약간 늦어짐. 사용량의 증가에 따라 늘어남	플레인 콘크리트보다 약간 늦어짐	베이스 콘크리트보다 약간 늦어짐
압송성	압력손실 큼	압력손실 적음	AE감수제 콘크리트와 동일

4) 기타 혼화제

그 외에 사용되고 있는 혼화제에는 다음과 같은 것이 있다.

- ① 방청제 : 철근의 부식 억제
- ② 수축저감제 : 주로 건조수축 방지 목적(물의 물리적인 특성을 변화)
- ③ 응결, 경화 시간 조절제 : 지연제, 촉진제, 초지연제, 급결제
- ④ 양생제, 착색제, 분리 저감제, 수화열 억제제, 즉시 탈형 혼화제, 곰팡이 방지제
- ⑤ 방수제 : 흡수, 투수에 대한 저항성 증진
- ⑥ 기포제 : 콘크리트의 경량화 목적
- ⑦ 발포제 : 팽창성 부여 목적

표 2.4는 KS F 2560 콘크리트용 화학혼화제의 종류 및 성능을 구분하여 나타냈다.

**표 2.4 화학 혼화제의 종류 및 품질규격(삼표 시멘트)**

종 류 항 목		AE제	감 수 제			AE감수제			고성능 AE감수제	
			표준	축진	지연	표준	축진	지연	표준	지연
감수율(%)		6 이상	4 이상	4 이상	4 이상	10 이상	8 이상	10 이상	18 이상	18 이상
블리딩비(%)		75 이하	100 이하	100 이하	100 이하	70 이하	70 이하	70 이하	60 이하	70 이하
응결 시간 차 (min)	초결	-60 ~ +60	-60 ~ +90	+30 이하	+60 ~ +210	-60 ~ +90	+30 이하	+60 ~ +210	-30 ~ +120	+90 ~ +240
	종결	-60 ~ +60	-60 ~ +90	0 이하	+210 이하	-60 ~ +90	0 이하	+210 이하	-30 ~ +120	+240 이하
압축 강도비 (%)	재령 3일	95 이상	115 이상	125 이상	105 이상	115 이상	125 이상	105 이상	135 이상	135 이상
	재령 7일	95 이상	110 이상	115 이상	110 이상	110 이상	115 이상	110 이상	125 이상	125 이상
	재령 28일	90 이상	110 이상	110 이상	110 이상	110 이상	110 이상	110 이상	115 이상	115 이상
길이변화비(%)		120 이하	120 이하	120 이하	120 이하	120 이하	120 이하	120 이하	110 이하	110 이하
동결융해에 대한 저항성		80 이상	-	-	-	80 이상	80 이상	80 이상	80 이상	80 이상
경시 변화	슬럼프 (cm)	-	-	-	-	-	-	-	6.0 이하	6.0 이하
	공기량 (%)	-	-	-	-	-	-	-	±1.5 이내	±1.5 이내

### 2.2.3 콘크리트 목적에 따른 혼화제의 선택방법

콘크리트에 사용되는 혼화제는 종류가 매우 많아 보이지만, 실제 그 기능에 따라 분류하면 감수제와 고성능 감수제가 있으며, AE제, AE감수제, 고성능 AE감수제 같은 공기연행제인 혼화제로 분류할 수 있다. 그러므로 혼화제는 콘크리트에서 요구하는 성능에 맞추어 그 기능을 선택하고 사용하여야 한다.

#### 1) 작업성의 증진 목적

작업성 증진을 목적으로 혼화제를 사용하는 경우는 AE제, 감수제, AE감수제, 고성능 감수제, 고성능 AE감수제 등의 모든 종류의 혼화제를 사용할 수 있다.

#### 2) 동결융해에 대한 저항성 개선목적

동결융해에 저항성은 미세한 공기포를 콘크리트에 연행시켜 개선되므로 AE제, AE감수제, 고성능 AE감수제 등의 AE제 및 AE가 첨가되어 있는 혼화제를 사용한다.

#### 3) 수밀성 개선목적

수밀성을 개선목적을 위해 콘크리트는 균질성이 좋고 재료분리가 적어야 조직을 가급적 치밀하게 만들 수 있어 수밀성이 개선되므로 단위수량과 블리딩을 감소시켜야 한다. 완전히 수화된 시멘트는 W/C(물-시멘트비)가 40%정도는 시멘트 분말도에 상관없이 모세관의 공극을 남기지 않아 수밀성이 향상되게 된다. 수밀성이 높은 콘크리트를 제조하기 위한 방법들으로는 다음과 같다.

(1) W/C(물-시멘트비)를 50% 이하로 할 것.

(2) 골재의 입도가 양호한 경우 단위 시멘트량은 적어도  $300\text{kg}/\text{m}^3$  이상을 반드시 사용할 것.

(3) 가능한 한 블리딩의 발생을 줄일 것.

(4) 낮은 W/C(물-시멘트비)로 인하여 불량한 다짐이 일어나지 않도록 유동성이 있는 콘크리트를 사용할 것.

이런 방법 토대로 사용한다면 수밀성이 있는 콘크리트를 충분히 제조할 수 있게 된다. 그러므로 AE감수제, 고성능 감수제, 고성능 AE감수제, 방수제 등의 단위수량을 낮추고 W/C(물-시멘트비)도 낮출 수 있는 혼화제를 사용해야 한다.

#### 4) 화학적 중성화 방지 및 침식 목적

시멘트 경화체가 염산과 접촉되면 물에 쉽게 녹는 염화알루미늄, 염화철과 염화칼슘을 생성하며 규산은 가용성의 규산이 되어 녹게 된다. 또한 질산, 황산과 같은 다른 강산에서는 질산염, 황산염 등을 생성하게 된다. 그러므로 실제 생각할 수 있는 산이 포함된 종류에서는 시멘트 성분에 영향을 끼쳐 물에 쉽게 녹는 염을 생성시킨다.

습윤 환경에 노출된 특정지역의 콘크리트는 알칼리 반응으로 인한 유해한 팽창이 발생하는 것을 방지를 위한 방법으로 포졸란 재료, 저알칼리 시멘트 그리고 무해한 골재를 사용해야 한다. 화학적 침식을 방지하기 위한 방법으로는 수밀한 콘크리트 및 고강도화 콘크리트를 만들어 확산을 방지해야하므로 고성능 감수제, 고성능 AE감수제, 방청제, 알칼리 골재반응 억제제 등의 혼화제를 사용하면 낮은 W/C(물-시멘트비)를 사용한 콘크리트를 고강도화하면 방지 할 수 있고 또한 콘크리트의 내구성을 증진시킬 수 있다.

#### 5) 건조수축 저감목적

콘크리트 건조수축에 영향을 주는 요인으로 W/C(물-시멘트비), 단위수량, 단위시멘트량, s/a(잔골재율) 등이 있지만 콘크리트의 시공성, 내구성, 경제성 등을 종합해보면 건조수축저감목적에 가장 효과적인 방법은 단위수량을 감소시키는 방법이다. 일반적으로 단위수량이 증가하면 잉여수도 증가하고 수분의 증발도 증가하므로 건조수축율도 높아지게 되므로 AE감수제, 고성능 감수제, 고성능 AE감수제, 건조수축 저감제 등의 감수율이 높은 제품을 사용하여 단위수량을 감소시켜야 한다.

#### 6) 고강도 콘크리트 제조목적

통상적으로 사용하는 강도 및 지역적 또는 국가 기술개발의 정도에 따라 고강도 콘크리트는 변화되었고, 범위를 한정하기에는 어려움이 있다. 미국의 경우 고강도 콘크리트의 강도 하한선을 보통골재를 사용하는 경우 42MPa 이상으로 규정하는 경우와, 지역에 따른 편차를 고려하여 62MPa 이상의 콘크리트를 고강도콘크리트라고 정의하고 있다. 일본의 경우에는 설계기준강도 36MPa 이상인 콘크리트를 고강도 콘크리트로 정의하고 있으며, 국내의 경우 지방서에 의하면 기존에는 설계기준강도 36MPa 이상의 콘크리트를 고강도 콘크리트로 정의되었으나, 1990년도 말에 개편되어 토목공사 및 건축공사에서 40MPa 이상으로 상향조정되었다.

고강도 콘크리트의 메카니즘은 시멘트 페이스트 중의 모세관 공극을 가급적 적게 하

는 것이 고강도 콘크리트의 기본개념이다. 이를 위해서는 W/C(물-시멘트비)를 최소한 작게 하여 모세관 공극을 줄여주는 것이다. 콘크리트의 압축강도는 시멘트 페이스트의 공극과 밀접한 관계가 있으므로, 페이스트 중의 공극뿐만 아니라 다짐부족으로 인한 큰 공극, 블리딩에 의한 골재면의 결함, 공기연행제 혼화제 사용에 의한 과량의 공기량 등은 특히 강도저하의 원인이 된다. 일반적으로 고강도콘크리트를 만드는 방법으로는 다음과 같다.

- (1) 결합재 자체의 품질개선에 의한 고강도화
- (2) 페이스트의 공극감소에 의한 고강도화
- (3) 골재표면과 결합재의 부착성능 개선에 의한 고강도화
- (4) 시멘트 이외의 결합재 사용에 의한 고강도화

4 가지 방법 중 어느 하나의 방법을 사용하여도 다른 방법이 관련이 있을 경우가 많으므로 모든 방법의 연관성을 잘 파악하여야 한다. 따라서 고강도 콘크리트를 제조하기 위해서는 감수율 18%이상을 갖는 고성능 감수제, 고성능 AE감수제 등의 혼화제를 사용한다.

#### 7) 응결, 경화속도의 조절목적

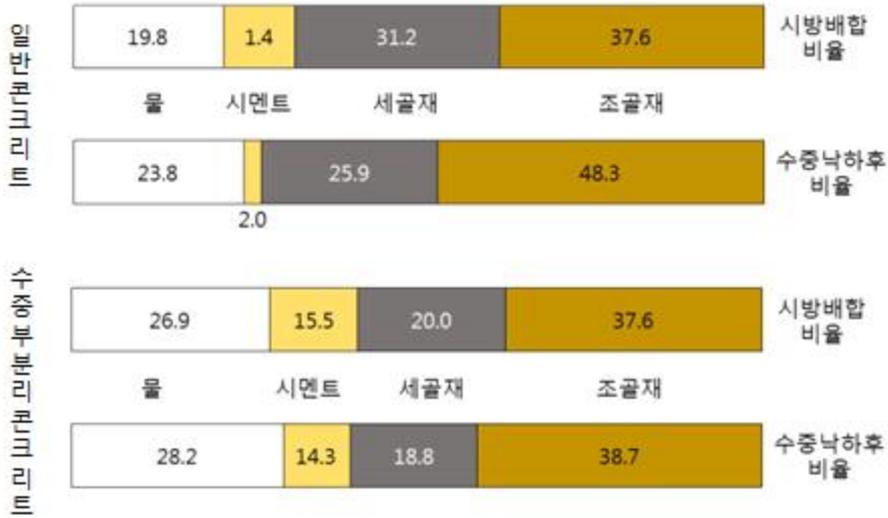
응결속도의 조절은 지연과 촉진에 있으며, 지연작용은 콘크리트에 첨가된 지연성분이 시멘트 입자표면의 Ca<sup>+</sup> 이온과 반응하여 표면에 지연제의 보호막을 형성시켜 C3S가 물과 접촉하여 수화되는 것을 해하여 지연시키는데 이 피막은 시간의 경과와 함께 물의 삼투압과 천천히 진행되는 수화반응으로 생성된 수화반응물의 팽창압 등으로 파괴되어 수화반응이 서서히 가속되어 응결하게 된다. 이에 반하여 촉진작용은 첨가된 성분이 시멘트 수화 복기에서 고체상태의 Ca<sup>+</sup> 이온의 용출에 관여하여 C3S의 수화를 촉매처럼 촉진시키는 것이다.

이처럼 응결과 경화속도를 조절하기 위해서는 일반적인 경우엔 촉진제, 지연제를 사용하고 특별한 경우에는 내한촉진제, 급결제, 초지연제를 사용한다.

#### 8) 콘크리트의 분리억제 목적

수중에 콘크리트를 타설하는 방법은 오래전부터 존재하였지만 수중에 콘크리트를 타설하게 되면 재료분리가 나타나 대부분의 시멘트가 수중에 유출되어 수중 생태계의 환경오염이 심각하게 발생되거나 콘크리트의 강도 저하된다. 그림 2.11에 일반콘크리트와 수중분리 콘크리트의 수중낙하 전과 낙하 후의 각 재료별 용적백분율을 나타냈으며,

일반콘크리트는 시멘트량이 급격하게 감소함을 알 수 있으나 수중부 분리 콘크리트는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이러한 결과로 분리저감제를 사용하면 수중에서도 시멘트가 분리되지 않고 양호한 작업성을 유지할 수 있다.



각 재료의 용적 배분율

그림 2.11 일반·수중부분리 콘크리트의 용적 백분율(주식회사 MK)

## 2.3 동결융해

### 2.3.1 동해에 의한 피해사례

#### 1) 국내 기상조건

일평균기온이 0℃ 이하로 되는 경우 동해가 발생한다. 국내의 기상조건으로 판단해 보았을 때, 거의 모든 지역은 동해가 발생할 수 있으며 기온이 올라갈 경우 다시 융해가 발생한다. 이러한 동결융해 현상은 반복되며, 콘크리트에 영향을 미친다. 동결융해 작용에 미치는 온도 요인으로서 동결속도, 동결 최저온도 및 지속시간, 융해온도가 있으며, 동결융해 작용에서 동결 최저온도 의한 콘크리트의 내구성능 저하는 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 그리고 동결 최저온도의 지속시간, 융해온도 및 동결속도는 자연환경의 온도범위에서 동결융해에 대한 저항성에 큰 영향을 주지 않는다고 알려지고 있다.

#### 2) 콘크리트의 동해 형태와 피해사례

동결융해가 발생한 콘크리트의 열화 형태는 균열, 표면박리 및 팽 아웃 등으로 분류되며, 이러한 작용은 구조물의 미관을 해치고 부재의 내력을 감소시켜 구조물의 내구성에 영향을 미친다.

동해 피해를 받기 쉬운 구조물은 물과 접촉한 상태에서 동결융해가 발행한 경우이다. 그림 2.12는 건축물이 동해를 받는 사례이며, 보통 건물의 외부 주변은 물과 접촉하는 기회가 적어 동해가 자주 발생하지는 않는다. 그러나 외벽에서도 눈이 녹을 때 생기는 물에 의해 동해가 발생한다. 건축구조물에서 동해가 가장 많이 발생하는 부분은 돌출부(처마, 현관차양, 옥상의 파라벳, 창대), 외벽면의 특수부분(개구부, 모서리부, 배기부하부), 바닥면(방수층, 손잡이), 옥외계단 등이다. 그림 2.13은 토목구조물에서의 동해 피해 사례이다. 종류가 많고 동해의 피해 형태도 다르지만, 보통 물과 직접적으로 접촉하는 기회가 많아 기상작용이 가혹한 지역에 위치되는 경우가 많으므로 건축구조물과 비교했을 때, 동해의 피해를 받기 쉬운 조건에 있다고 할 수 있다. 토목구조물에 동해의 피해가 많이 발생하는 부분은 교량의 교대, 교각, 난간 및 배수구, 방호벽, 옹벽, 경계블록 및 방파제 등의 물과 접촉이 쉬운 해안 구조물, 수리구조물 등이 동해에 대한 피해가 많이 발생한다.



(a) 처마



(b) 현관차양



(c) 옥상 파라펫



(d) 창대

그림 2.12 건축구조물에서의 동해피해 사례(이규삼, 2008)



(a) 교량 교대

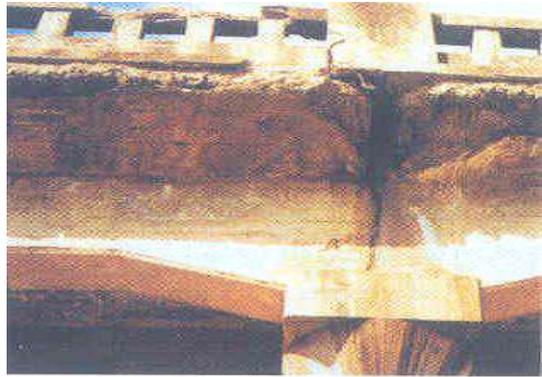


(b) 교량 교각

그림 2.13 토목구조물에서의 동해피해 사례(이규삼, 2008)



(c) 교량난간



(d) 교량의 배수구



(e) 방호벽



(f) 옹벽



(g) 경계블럭



(h) 방파제

그림 2.13 계속

### 2.3.2 콘크리트의 동해발생 매커니즘

동결융해에 의한 콘크리트의 손상은 내부에서 발생한 미세균열으로 인해 파괴되는 내부균열과 외부 표면이 떨어져 나가는 표면박리로 나눌 수 있다. 콘크리트의 내부균열은 콘크리트 내부 팽창압이 역학적 특성을 손상시키는 경우 발생되고, 표면박리는 콘크리트 표면의 모르타르 조각 및 시멘트 페이스트가 떨어지는 현상을 말한다. 표면박리가 심할 경우 골재가 떨어져 나갈 수도 있다. 제설제에 의한 표면박리를 제외한 표면 표면박리는 동결에 의한 내부균열 매커니즘과 유사하다고 볼 수 있다. 특히 콘크리트가 물속에 있는 경우 동결될 때 에는 내부 균열과 더불어 표면박리가 발생할 수 있다(Pigeon and Pleau, 1995).

#### 1) 동상설

콘크리트의 동해 매커니즘을 “흙의 동상이론”으로 설명하였으며, 콘크리트의 냉각은 외부에서 내부로 진행되고, 내부에서 수분의 동결온도에 도달하였을 때 큰 공극 내부의 수분이 동결을 시작한다고 하였다(Collins, 1944). 동결이 내부 층에서 발생하는 동안 잠열에 의해 일정온도를 유지하며 미리 형성된 빙정은 보다 작은 공극의 물과 접촉하여 흡수하면서 커지고 1개의 층을 형성한다. 콘크리트의 열화는 콘크리트의 강도가 약한 경우 동일 평면상에서 형성되어 수분의 공급이 끝나면 열화는 보다 내부로 진행하게 되며, 이후의 동결은 이전 동결의 영향이 없는 내부에서 발생하게 된다. Collins의 이론에 의하면 콘크리트 열화는 표면에서 내부로 진행되며, 경화된 콘크리트의 동해 발생 매커니즘 보다는 초기동해 발생 매커니즘에 해당한다고 할 수 있다.

#### 2) 수압설

경화된 콘크리트의 동해를 수압설을 설명하였으며, 물은 동결할 때에 최대 9%의 체적팽창이 발생하며 시멘트 페이스트 내부에서는 공극의 벽으로 팽창이 이동된다고 하였다(T. C. Powers, 1945). 이 체적 팽창률을 완화하는데 필요한 공기로 가득찬 자유공극이 존재하지 않을 경우 큰 압력이 발생하고, 콘크리트의 내구성 저하의 원인이 된다. 온도가 떨어지면 큰 공극의 물이 동결하며, 이어서 작은 공극의 물이 동결된다. 그림 2.14와 같이 작은 공극 중의 물이 동결하는 과정에서는 큰 공극 중에 생긴 얼음 결정에 의해 팽창이 구속된다. 이 팽창을 완화할만한 자유 공극이 없을 경우에는 큰 정

수압이 공극의 벽에 영향을 미치며, 인장강도에 도달할 경우 균열이 발생된다. 이렇게 반복되는 팽창압의 작용으로 결국은 콘크리트 표면이 파괴되며, 이 공극에 작용하는 정수압은 함수량, 콘크리트중의 기포와 그 사이의 간격 및 콘크리트가 냉각되는 속도에 따라 다르다.

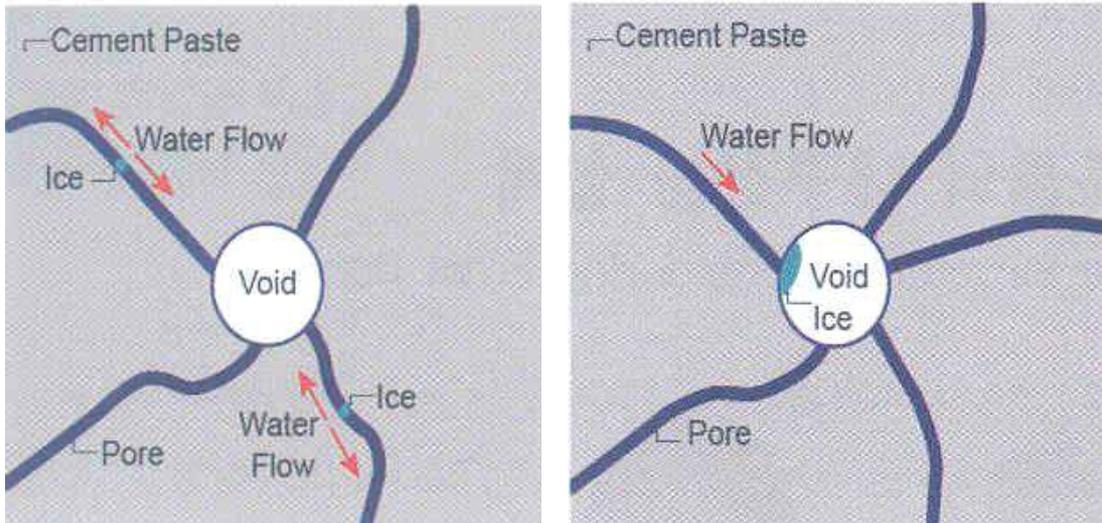


그림 2.14 수압설의 개념도(Powers T.C., 1945)

### 3) 정수압

콘크리트의 냉각 과정에서 표층부가 동결하는 온도에 도달하면, 동결층은 순차적으로 내부층으로 진행되며 콘크리트 내부층은 초기에는 콘크리트의 표면에 접촉하는 물이 동결하여 얼음이 표면을 감싼 상태가 되고, 표면에 가까운 모세관 공극에 물이 동결하여 얼음으로 변화함에 따라 체적팽창 분에 상당하는 미동결의 물이 포화되지 않으며 동결되지 않은 내부의 공극으로 이동하게 된다. 이 미동결수의 이동은 미세한 공극 내에서 발생하므로 점성저항에 의한 정수압을 발생시키고, 이 정수압이 인장파괴강도보다 작으면 균열은 발생하지 않게 된다. 반면 일반적인 냉각속도 범위에서 미동결수가 이동하는 것은 시멘트 경화체 조직의 파괴를 일으키며, 이는 충분한 압력으로 작용하게 된다. 이러한 압력은 콘크리트 내부의 투수성이 낮은 경우에 동결하는 물의 양이 많거나 냉각속도가 빠른 경우 더욱 커지게 된다. 메커니즘에 의한 열화를 방지하기 위해서는 공기로 가득 찬 공극이 필요하다.

공기는 정수압이 가해졌을 때 체적이 축소되어 팽창압이 완화되기 때문이다. 동결로 발생하는 팽창량 이상의 자유공극 있으며 기포간의 간격이 좁으면 미동결수의 이동에 따른 압력 발생이 어려워 동결에 의한 피해가 방지된다. 반면 큰 기포가 떨어져 존재하는 경우에는 이동수가 기포에 도달하기 전에 압력이 콘크리트의 균열을 발생시킬 정도로 높아지게 되는데, 이러한 이유로 AE제 같은 연행공기는 닫힌 공기에 비해 동결 용해에 대한 저항성 방지에 유효한 영향을 줄 수 있다.

콘크리트는 다공질이며 내부는 크기가 다른 공극들이 존재하여 내구성, 내하력 등에 영향을 준다. 콘크리트 중의 공극은 보통 연행공기, 닫힌공기 이외에 켈공극 또는 모세관 공극으로 분류한다. 이 중에서 켈 공극은 매우 미세하여 동결되지 않으며, 모세관 공극은 일반적인 기상조건에서 동결 가능한 수분이 포함된다.

#### 4) 침투압

침투압은 공극과 얼음의 사이의 미동결수에서 발생된다. 이것은 모세관 공극에서 얼음의 결정이 형성되어 얼음의 결정에 비해 작은 세공에서 흡수하는 미동결수에서 발생한다. 이러한 침투압 현상은 한계포화에 물을 가까운 영역으로 이동시키는 원인이 되며 조직이 파괴된다. 이것이 작은 W/C(물-시멘트비)를 가진 콘크리트에 있는 주요한 동결용해에 대한 저항성의 메커니즘이다. 염류의 작용을 동반한 경우 침투압은 더욱 커진다. 해수에 접촉된 AE 콘크리트에서는 표면층의 표면박리가 진행 단계에서도 팽창 열화를 볼 수 없는데 이것이 침투압의 작용에 의한 것이라고 할 수 있다.

#### 5) Wiedemanm 이론

습윤 콘크리트를 냉각 또는 가열시에 발생하는 변형률을 그림 2.15과 같이 9개의 온도범위로 나누어서 콘크리트의 조직변화와 성질을 설명하였다(Wiedemanm, 1982). NO.1에서 세공은 수분으로 가득 차 있으며 냉각 중에 수축이 발생하며, NO.2에서는 큰 세공부터 냉각이 시작되며 빙정이 형성되면 주변 수분을 흡수하여 성장한다. 세공 크기 이상 성장하면 여분의 수분은 수분으로 채워지지 않은 주위의 세공으로 이동하고 얼음의 팽창보다도 수분과 시멘트 매트릭스의 수축량이 크므로 콘크리트는 수축한다. NO.3에서 큰 세공 및 작은 세공 모두 얼음으로 채워지며 응력의 발생이 시멘트 매트릭스에 작용하여 균열발생과 함께 콘크리트는 팽창하며, NO.4의 온도가 떨어짐에 따라 시멘트 매트릭스보다 수축률이 높아 콘크리트는 수축되며 공극간의 응력은 거의 발생하지 않는다. 따라서 압축강도는 다시 증가한다. NO.5는 온도의 저하에 따라 얼음의

체적은 세공체적보다도 작아지며, NO.6에서는 콘크리트 냉각과 동일한 거동으로 팽창한다. 얼음의 온도의 증가에 따른 체적 팽창은 콘크리트보다 크기에 세공은 얼음으로 가득 채워진다. NO.7에서 냉각과정에서 작은 세공의 수분이 큰 세공으로 이동해서 동결하였기 때문에 가열중의 얼음의 체적이 세공중의 체적을 상회한다. 따라서, 냉각과정보다도 가열과정에서 콘크리트가 팽창하는 원인으로 나타난다. NO.8에서는 세공중 얼음이 녹아 콘크리트는 수축한다. NO.9에서는 콘크리트가 극 저온의 온도이력을 거치며 상온이 된 후에는 잔류소성변형이 생기며 이는 콘크리트의 열화와 밀접한 영향을 미친다.

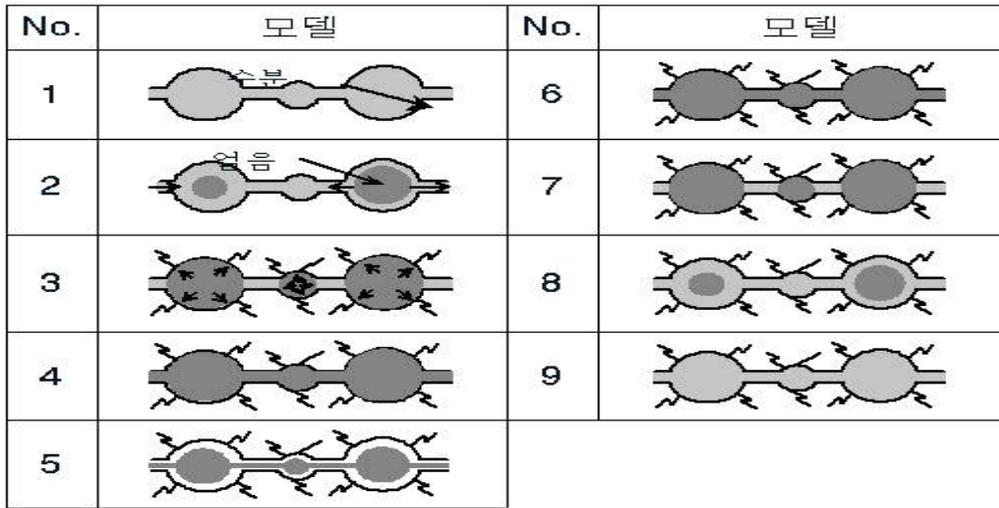


그림 2.15 9개의 온도범위에 따른 습윤 콘크리트의 변형률(Wiedemann, 1982)

### 2.3.3 표면박리

표면박리란 동결에 의해 발생하는 콘크리트 표면 손상을 말한다. 표면박리는 콘크리트 내부균열은 발생하지는 않으며, 콘크리트 표면에만 영향을 주어 표면이 박리되고 두께를 감소시키게 된다. 그 결과 구조적인 성능을 떨어뜨리고 철근이 있는 경우 철근의 부착력을 감소시키게 된다(Fagerlund, 1995). 표면박리는 동결과 용해의 사이클이 증가할수록 손상이 가속되며, 그림 2.16과 같이 가속 형태는 3가지(linear, accelerated, retarded)로 나타난다고 하였다.

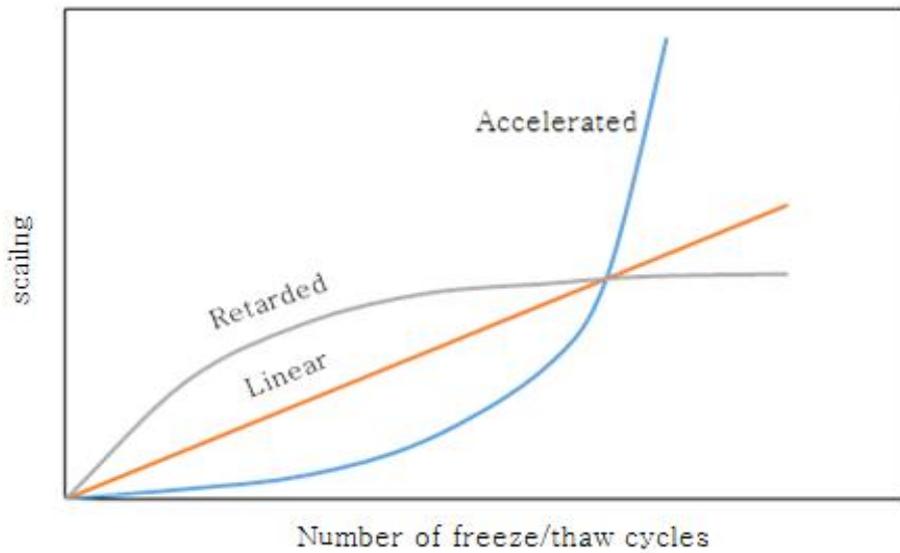


그림 2.16 표면박리의 3가지 타입(Fagerlund, 1995)

콘크리트가 동결융해의 작용을 받을 경우의 초기 징후로서 대부분 콘크리트의 표면에 미세한 균열이 발생하며, 동해의 원인에 따라 균열의 발생위치와 범위는 다르게 나타난다. 균열이 비교적 넓은 부분에 나타나는 콘크리트는 표면에 나타나는 지도 모양의 문상 균열과 구조물 균열 및 구조물 이음부를 따라 발생하는 D 균열 등이 있다. 이러한 균열은 시간이 경과하면서 넓어지고 표면박리 발생으로 이어지는 경우가 많다. 또한 초기동해를 받는 콘크리트는 푸석푸석하게 된 표면층의 하층부에 수평 균열이 발

생한다.

콘크리트의 표면박리는 동결융해에 의한 열화 형태 중 가장 일반적으로 발생하고, 초기단계에서 시멘트 페이스트 막이 벗겨지는 것을 필링이라 한다. 표면박리는 콘크리트 표층의 모르타르 및 시멘트 페이스트가 떨어지는 현상부터 시작되며 굵은 골재 사이의 모르타르 및 굵은 골재가 떨어지는 현상까지 진행된다. 그림 2.17은 시멘트 페이스트가 얇게 떨어지는 단계부터 그로 인하여 굵은 골재까지 나타나는 단계까지의 열화 형태를 나타낸 것이다.

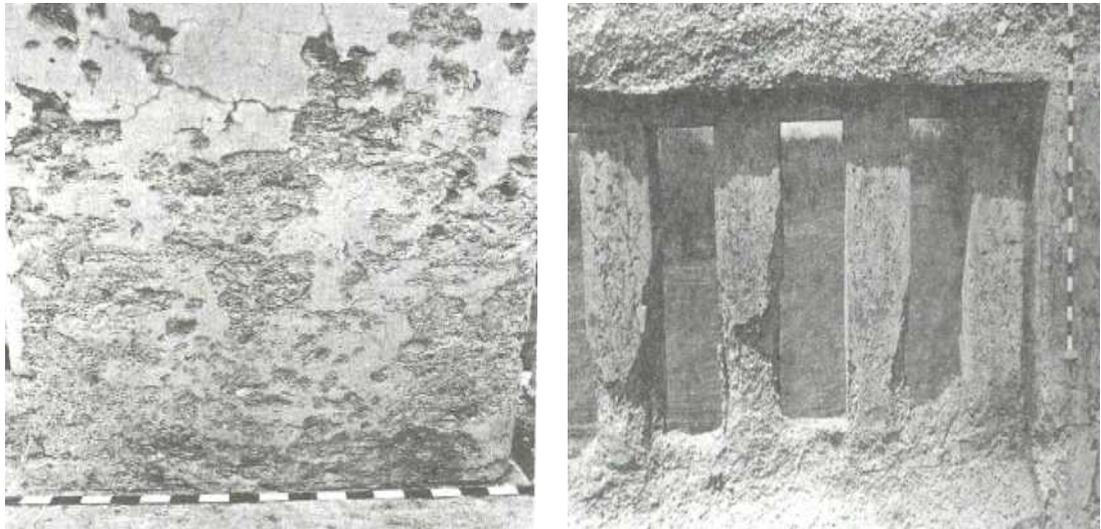


그림 2.17 동해에 의해 콘크리트 구조물에 발생한 표면박리 현상(이규삼, 2008)

팝아웃은 그림 2.18와 같이 콘크리트 표면에서 강도가 작은 골재가 동결 팽창하여 외층의 모르타르 부분을 박리시켜 구멍이 생기는 형태이다. 떨어진 모르타르는 동해의 원인이 아닌 초기단계 팝아웃 현상의 미세한 균열로 둘러싸인 원뿔형 모르타르가 남아 있다. 골재의 손상은 시간이 경과하면서 진행되며 최종단계에서는 골재는 완전히 손상되어 구멍으로 남는다.

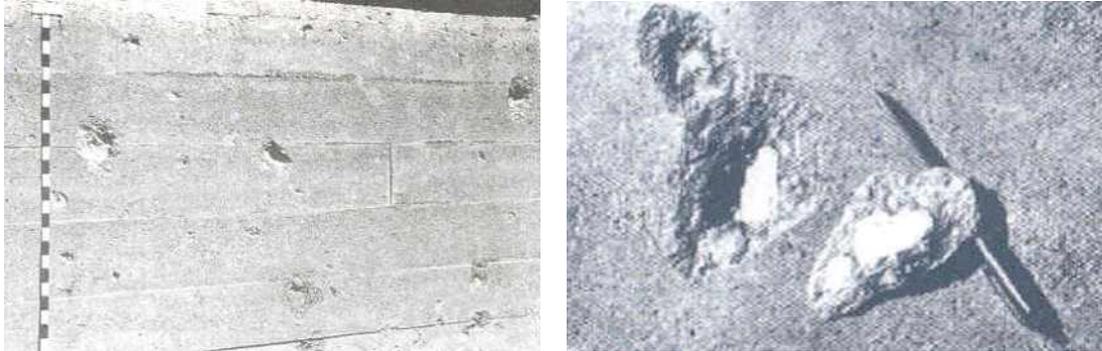


그림 2.18 동해에 의한 팍아웃 현상(이규삼, 2008)

표면박리는 이미 1950년대에 실내에서 시험을 통해 증명되었으며, 이후 현장 시험을 통해 증명이 되었다(Amfelt, 1943; Verbeck, 1957; Jana, 2004). 콘크리트의 표면박리는 제설제와 동결융해에 의한 콘크리트의 표면 손상으로 표면이 6~12mm 정도 박리되고, 제설제로 인한 화학적 부식과 동결융해 반복으로 인한 물리적 손상으로 보고 있으며, 강도저하에 따른 동결융해 손상과는 다르다고 하였다(김진철, 2015).

표면박리는 내부동결과 이로 인한 강도 감소 현상으로 발생하는 동결융해 손상과는 다르다고 하였다(Valenza and Scherer, 2007). 제설제 역할을 할 수 있는 다양한 화학적 물질의 농도별로는 콘크리트가 노출되었을 경우, 공기연행제 유무에 따른 표면박리에 대한 특성을 비교하였으며, 그 결과 용액의 종류에 관계없이 중량비 약 3%의 농도에서 가장 손상이 크게 나타났다고 하였다(Verbeck and Klieger, 1957). 또한 결합재 속 공기연행제가 표면박리 저항성을 향상 시키는 것으로 나타났으며, 연행공극은 긍정적인 효과가 있는 것으로 보고하였다.

표면박리 저항성과 간격계수간 상관관계에 대한 연구의 경우, 그림 2.19와 같이 300  $\mu\text{m}$  이하의 크기를 가진 공극량이 표면박리와 밀접한 상관성이 있음을 밝혔으며, 많은 연구자들은 간격계수가 250~300 $\mu\text{m}$  이하 이면 콘크리트의 종류에 관계없이 표면박리 저항성을 만족한다고 하였다. 그리고 공극간 거리가 임계치 보다 클 경우, 질량 손실은 간격계수에 비례한다고 하였다(Siebel, 1989).

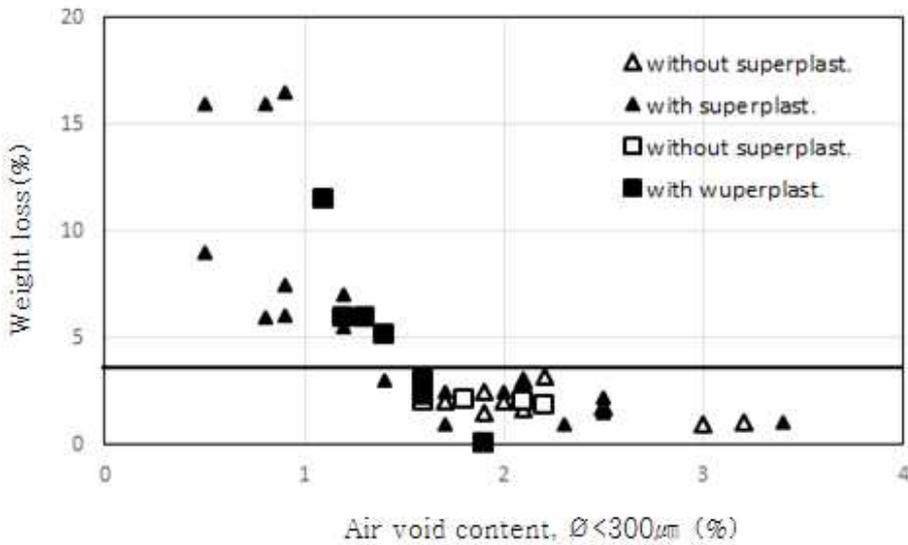


그림 2.19 표면박리 손상과 공기량과의 상관관계 (Siebel, 1989)

한편, 내부 동결에 대한 임계 간격계수는 콘크리트 종류에 따라 다양하다는 연구도 있다(Pigeon, 1986). 이러한 모순은 표면박리와 내부 동결에 대한 두 개의 서로 다른 메커니즘이 있기 때문이다. 연행공극은 블리딩을 감소시키고, 연행공극 내 얼음이 주변의 미세 공극 속의 액체를 빨아들여 압축시키기 때문에 표면박리 저항성에 도움이 된다(Valenza and Scherer, 2007).

## 제 3 장 실험 방법

### 3.1 콘크리트 공시체 준비

#### 3.1.1 시료의 채취

골재의 특성을 파악하기 위해 골재 산지의 예비조사와 적부 판정, 출하 시 골재의 검사 및 시공 중 골재의 검사를 목적으로 굵은골재, 잔골재의 시료를 채취하는 방법에 대하여 규정한 「KS F 2501 시료의 채취 방법」에 준하여 채취한다.

#### 3.1.2 체가름 시험

콘크리트용 골재로서의 적부 판단 및 골재 사용비율 결정, 콘크리트의 배합설계 및 품질관리 등에 필요한 부순 모래의 물성을 파악하기 위해 「KS F 2502 골재의 체가름 시험 방법」에 의하여 그림 3.1의 체가름 시험기를 이용하여 실시하였으며, 10mm, 5mm, 2.5mm, 1.2mm, 0.6mm, 0.3mm, 0.15mm로 분류하여 시험을 실시하였다.



그림 3.1 체가름 시험

### 3.1.3 잔골재의 밀도 및 흡수율 시험

콘크리트에 사용되는 잔골재의 표면건조 포화상태를 파악하기 위해 「KS F 2504 잔골재의 밀도 및 흡수율 시험방법」에 의하여 실시하였다.



그림 3.2 잔골재의 표면건조 포화상태 시험

### 3.1.4 시멘트

본 연구에서는 국내 S사 포틀랜드 시멘트 1종을 사용하여, 시멘트의 특성은 표 3.1와 같다.

표 3.1 포틀랜드 시멘트 특성

밀도 (%)	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	강열감량 (%)	응결시간		압축강도		
			초결 (분)	종결 (분)	3일 (MPa)	7일 (MPa)	28일 (MPa)
3.15	3,600	3.23	210	05: 05	29.4	37.1	56.8

### 3.1.5 화학 혼화제

본 연구에서는 부순모래를 사용시 작업성 향상시키고 콘크리트에 균열 발생 우려가 있는 콘크리트에 사용되는 국내 M사에서 생산되는 폴리카르본산계의 고성능 AE감수제 표준형을 사용하였다. 그림 3.3은 본 연구에서 사용한 GENESIS-300EL이다. 본 제품은 적은 사용량으로 고감수력, 저발열, 고내구성을 발휘하여 콘크리트를 경제적으로 제조할 수 있으며, 물리·화학적 특성은 표 3.2와 같다



그림 3.3 고성능 AE감수제(GENESIS-300EL)

표 3.2 화학혼화제의 물리·화학적 특성

종 류 \ 항 목	밀도(20°C)	성 상	PH(20°C)	주 성 분
고성능 AE 감수제 표준형	1.03 ± 0.03	연미색 액상	4.0 ± 2.0	폴리카르본산계

### 3.2 콘크리트 공시체 제작

본 연구에서는 물, 골재(부순모래, 굵은골재), 시멘트, 혼화제를 이용하여 배합하였으며, 모든 실험의 물, 골재, 시멘트는 일정하고 미립자 함유량과 혼화제 사용량을 조절하여 7 가지 조건으로 배합을 하였으며 표준 공시체를 제작하여 실험을 실시하였다.

표준 공시체의 콘크리트는 혼합용적 60L인 수가경식 믹서를 사용하여 제작하였으며, 콘크리트의 제작순서는 그림 3.4와 같이 부순모래, 굵은골재 및 시멘트 순으로 믹서에 투입하여 비빔을 실시한 다음 물에 고성능 AE 감수제를 투입하여 혼합비빔을 실시하여 표준 공시체 실험을 위한 공시체를 제작하였다.

본 연구에서는 FP는 미립자(Fine Particles), AD는 콘크리트 혼화제(admixture)를 나타내었으며, 미립자 함유량이 콘크리트에 미치는 영향과 미립자 함유량이 증가할 때 혼화제 사용량이 콘크리트에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 따라서 혼화제 사용량을 0.70%로 고정하여 미립자 함유량을 잔골재의 무게의 각각 22%, 15%, 7%, 2%, 0%으로 조절하였다. 또한 미립자 함유량을 잔골재 무게의 22%로 고정하여 혼화제 사용량을 0.70%, 0.85%, 1.00%로 각각 사용하였다.

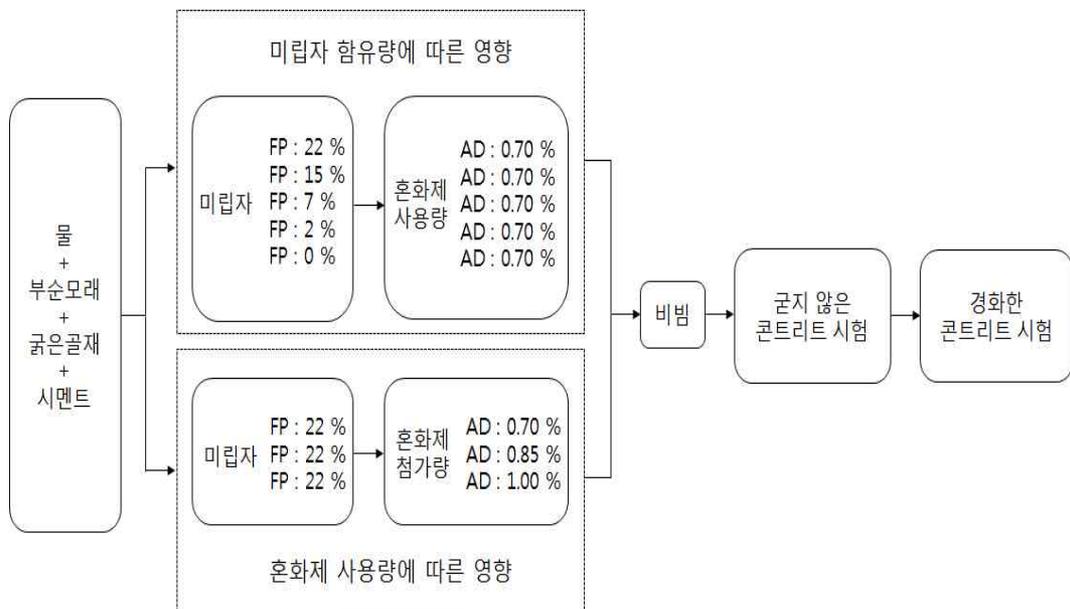


그림 3.4 표준 공시체 실험 콘크리트 제작과정

### 3.2.1 배합내용 및 체가름 시험 골재 계량

표 3.3은 콘크리트를 제작하기 위한 배합내용이며, 본 연구에서는 모든 공시체에 W/C, S/a, 부순 모래 및 굵은골재의 무게를 동일하게 하였다. 미립자 함유량이 콘크리트에 미치는 영향을 파악하고자 공시체에는 잔골재 무게의 22%, 15%, 7%, 2%, 0%로 미립자 함유량을 조정하였으며, 혼화제는 시멘트 양의 0.70%를 첨가하여 미립자 함유량이 많고 적음에 따라 콘크리트에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 미립자 함유량이 많을 때 혼화제 사용량이 콘크리트에 미치는 영향을 파악하고자 잔골재 무게의 22%로 미립자 함유량을 조정하였으며, 혼화제는 시멘트 양의 0.70%, 0.85%, 1.00%로 각각 첨가하여 미립자량이 많을 때 혼화제 사용량에 따른 콘크리트에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

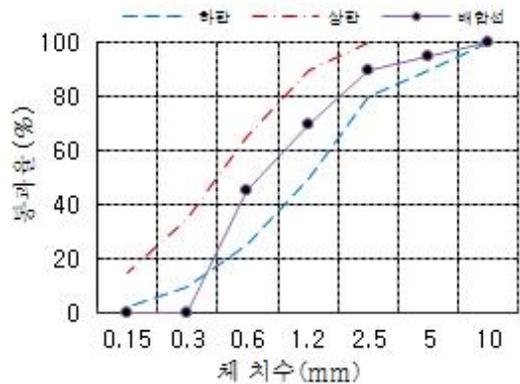
**표 3.3 표준 공시체 실험 배합 내용**

구 분	W/C (%)	S/a (%)	재 료 량(kg)					비 고 (미립자함유량)
			W	C	S	G	AD	
FP0-AD70	52.0	47.3	7.00	13.46	32.79	36.79	0.0942 (0.70%)	0%
FP2-AD70								2%
FP7-AD70								7%
FP15-AD70								15%
FP22-AD70								22%
FP22-AD85	52.0	47.3	7.00	13.46	32.79	36.79	0.1144 (0.85%)	22%
FP22-AD100	52.0	47.3	2.93	5.63	13.71	15.38	0.0563 (1.00%)	22%

표준 공시체 제작을 위해 채취한 부순 모래는 건조 후 체가름 시험을 실시하였으며, 그림 3.5는 체가름 시험을 통한 계량값과 계량값에 따른 입도분포곡선이다. 10~0.6mm에 대한 통과율은 일정하게 조정하였으며, 0.15mm에 대한 통과율은 잔골재 무게에 대한 미립자량과 같게 조정하였다.

FP7-AD70 공시체의 미립자 함유량에 따른 입도분포는 이론상 가장 이상적인 0.15mm에 대한 통과율이 7% 나타났다. 또한 미립자 함유량을 조절하기 위해 FP7-AD70 공시체를 기준으로 하였으며, FP22-AD70 공시체는 상한선을 초과한 0.15mm에 대한 통과율이 22%이며, FP15-AD70 공시체는 상한선과 일치하는 0.15mm에 대한 통과율이 15%이다. FP2-AD70 공시체는 하한선과 일치하는 0.15mm에 대한 통과율이 2%이며, FP0-AD70 공시체는 하한선 미만인 0.15mm에 대한 통과율이 0%로 조정하였다. 즉 배합에 따른 공시체는 잔골재 무게에 22%, 15%, 7%, 2%, 0%로 미립자 함유량을 설정하여, 0.15mm에 대한 통과율 또한 동일하게 조정하였다. FP22-AD85, FP22-AD100 공시체는 FP22-AD70 공시체와 동일한 미립자 함유량으로 설정하여 상한선을 초과한 0.15mm에 대한 통과율이 22%로 나타났다.

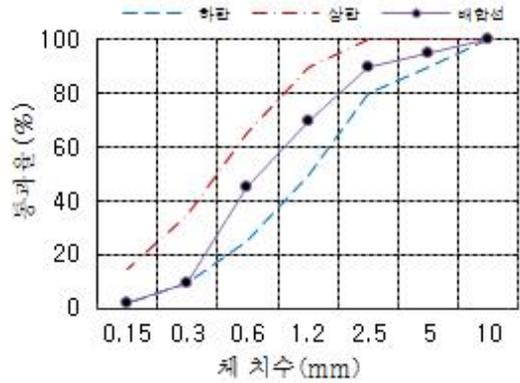
FP0-AD70				계량값	32.79
체치수 (mm)	체통과율(%)		누적잔유량 (%)	통과율 (%)	각 체 계량값 (kg)
	하한	상한			
10	100	100	0	100	0.00
5	90	100	5	95	1.64
2.5	80	100	10	90	1.64
1.2	50	90	30	70	6.56
0.6	25	65	55	45	8.20
0.3	10	35	100	0	14.76
0.15	2	15	100	0	0.00
미분			100	0	0.00
계		FM	3.00	97	32.79



(a) FP0-AD70 공시체

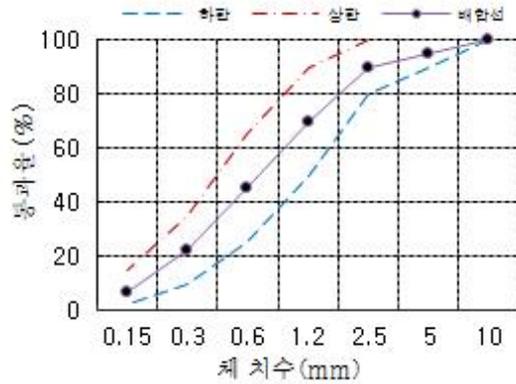
그림 3.5 체가름 골재 계량

FP2-AD70				계량값	32.79
체치수 (mm)	체통과율(%)		누적잔유 량 (%)	통과율 (%)	각 체 계량값 (kg)
	하한	상한			
10	100	100	0	100	0.00
5	90	100	5	95	1.64
2.5	80	100	10	90	1.64
1.2	50	90	30	70	6.56
0.6	25	65	55	45	8.20
0.3	10	35	90	10	11.48
0.15	2	15	98	2	2.62
미립자			100	0	0.66
계		FM	2.88		32.79



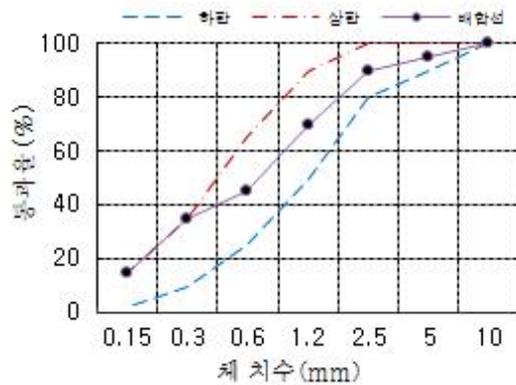
(b) FP2-AD70 공시체

FP7-AD70				계량값	32.79
체치수 (mm)	체통과율(%)		누적잔유 량 (%)	통과율 (%)	각 체 계량값 (kg)
	하한	상한			
10	100	100	0	100	0.00
5	90	100	5	95	1.64
2.5	80	100	10	90	1.64
1.2	50	90	30	70	6.56
0.6	25	65	55	45	8.20
0.3	10	35	78	23	7.38
0.15	2	15	93	7	5.08
미립자			100	0	2.30
계		FM	2.71		32.79



(c) FP7-AD70 공시체

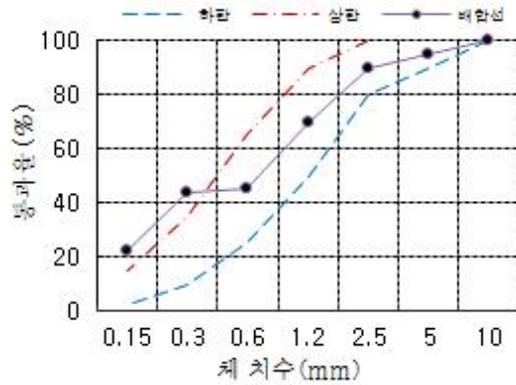
FP15-AD70				계량값	32.79
체치수 (mm)	체통과율(%)		누적잔유 량 (%)	통과율 (%)	각 체 계량값 (kg)
	하한	상한			
10	100	100	0	100	0.00
5	90	100	5	95	1.64
2.5	80	100	10	90	1.64
1.2	50	90	30	70	6.56
0.6	25	65	55	45	8.20
0.3	10	35	65	35	3.28
0.15	2	15	85	15	6.56
미립자			100	0	4.92
계		FM	2.50		32.79



(d) FP15-AD70 공시체

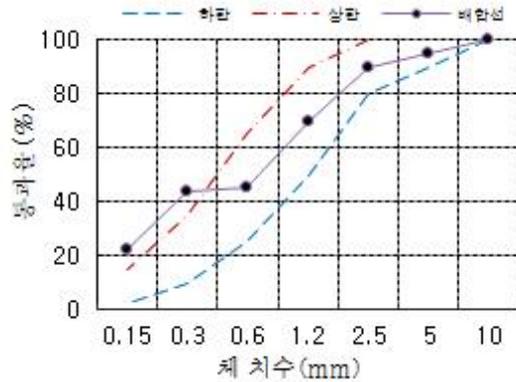
그림 3.5 계속

FP22-AD70				계량값	32.79
체치수 (mm)	체통과율(%)		누적잔유량 (%)	통과율 (%)	각 체 계량값 (kg)
	하한	상한			
10	100	100	0	100	0.00
5	90	100	5	95	1.64
2.5	80	100	10	90	1.64
1.2	50	90	30	70	6.56
0.6	25	65	55	45	8.20
0.3	10	35	56	44	0.33
0.15	2	15	78	22	7.21
미립자			100	0	7.21
계		FM	2.34		32.79



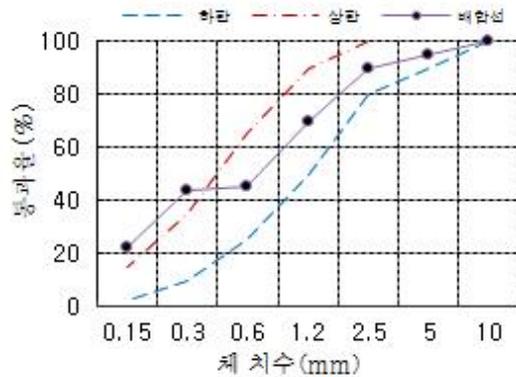
(e) FP22-AD70 공시체

FP22-AD85				계량값	32.79
체치수 (mm)	체통과율(%)		누적잔유량 (%)	통과율 (%)	각 체 계량값 (kg)
	하한	상한			
10	100	100	0	100	0.00
5	90	100	5	95	1.64
2.5	80	100	10	90	1.64
1.2	50	90	30	70	6.56
0.6	25	65	55	45	8.20
0.3	10	35	56	44	0.33
0.15	2	15	78	22	7.21
미립자			100	0	7.21
계		FM	2.34		32.79



(f) FP22-AD85 공시체

FP22-AD100				계량값	13.71
체치수 (mm)	체통과율(%)		누적잔유량 (%)	통과율 (%)	각 체 계량값 (kg)
	하한	상한			
10	100	100	0	100	0.00
5	90	100	5	95	0.69
2.5	80	100	10	90	0.69
1.2	50	90	30	70	2.74
0.6	25	65	55	45	3.43
0.3	10	35	56	44	0.14
0.15	2	15	78	22	3.02
미립자			100	0	3.02
계		FM	2.34		13.71



(g) FP22-AD100 공시체

그림 3.5 계속

### 3.2.2 공시체의 몰드 제작 및 양생

한국산업규격에서 정하는 「KS F 2403 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작 방법」에 준하여 몰드의 크기는 1:2의 크기를 추천하고 있으며, 실린더형 표준몰드( $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ )를 사용하여 압축강도 공시체를 제작하였다. 공시체의 재하면은 몰드 탈형 전에 캐핑(capping)을 실시하였으며, 표 3.4는 「KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법」에 의한 공시체 크기에 대한 캡의 치수를 정의한 것이다.

**표 3.4 공시체 크기 및 강제 캡의 치수(KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법)**

적용하는 공시체의 치수	부재의 치수(mm)			
	안지름	외부의 두께		깊이
	d	t	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>
$\phi 100 \times 200 \text{ mm}$	$102.1 \pm 0.1$	$18 \pm 2$	$11 \pm 2$	$25 \pm 1$

길이변화율 및 동결융해에 대한 저항성 공시체는 굵은골재의 최대 치수가 25mm 이하인 경우는  $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$  제작하여야 하며, 길이변화 측정용 공시체의 게이지 플러그는 그림 3.6과 같은 모양을 사용하였다. 게이지 플러그는 녹이 슬지 않는 금속제의 것을 사용하였고, 공시체의 길이 변화를 측정하기 위한 기준(표점)으로 사용된다. 또한 공시체 양끝으로부터 표점까지의 25 mm 이상이 되도록 부착되도록 하였다.

표면박리 공시체는 스테인리스  $200 \times 250 \times 55 \text{mm}$  박스로 제작하였다.



**그림 3.6 게이지 플러그**



(a) 압축강도 공시체 몰드



(b) 동결융해에 대한 저항성 공시체 몰드



(c) 길이변화율 공시체 몰드



(d) 표면박리 공시체 몰드

그림 3.7 실험에 사용된 공시체 몰드

본 연구에서는 그림 3.8과 같이 압축강도 9 개씩 3 조(3일, 7일, 28일 강도) 총 63 개 (1~7 배합), 동결융해에 대한 저항성 및 길이 변화 측정용 2 개씩 총 1 조 총 24 개(1~6 배합), 표면박리 측정용 1 개씩 총 6 개(1~6배합)를 제작하였으며, 공시체는 그림 3.9와 같이 성형 후 몰드를 제거하고 실험 전까지 주변의 온도를 23℃, 습도 65%로 유지하여야 하며, 온도 및 습도를 유지하기 위해 항온·항습의 설비를 가진 수조를 사용하여 양생을 실시하였다.

### 3.3 표준 공시체 실험



그림 3.8 공시체 제작 후



그림 3.9 몰드 양생

### 3.3 표준 공시체 실험

#### 3.3.1 슬럼프·공기량 실험

##### 1) 슬럼프 실험

부순 모래를 사용한 굳지 않은 콘크리트의 반죽질기, 연도, 점조성 및 작업성 등을 파악하기 위하여 「KS F 2402 콘크리트의 슬럼프 시험 방법」에 따라 슬럼프를 측정하였다.



그림 3.10 슬럼프 실험 과정

2) 공기량 실험

콘크리트의 강도 및 작업성에 영향을 미치는 굳지 않은 콘크리트의 공기량은 「KS F 2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법」에 준하여 워싱턴 에어미터를 사용하여 측정하였다.



그림 3.11 공기량 실험 과정

### 3.3.2 압축강도 실험

압축강도 실험은 「KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험 방법」에 준하여 실시하며, 부순모래의 미립자 함유량을 조절하여 제작, 양생된 공시체를 재령 3일, 7일, 28일에 측정하였다. 그림 3.12는 압축강도 측정기를 나타내고, 그림 3.13은 탈형 후의 공시체를 보여주고 있다. 각 배합별로 3 개의 공시체를 실험하여 평균값을 그 결과로 채택하였으며, 하중 재하는 일정한 속도로 재하하였다.



그림 3.12 압축강도 시험 장비



그림 3.13 탈형 후의 공시체

### 3.3.3 길이변화를 실험

부순 모래 콘크리트의 건조수축에 의한 길이변화 실험은 「KS F 2424 모르타르 및 콘크리트의 길이변화 시험방법」에 의한 방법 중 다이얼 게이지법을 이용하여 측정하였으며, 보존 기간 중, 공시체의 게이지 플러그를 손상시키지 않도록 하며, 공시체 주변의 환경 조건이 같고, 개개의 보존 조건도 동일하게 하여 주변은 약 25 mm 이상의 간격을 두어야 한다. 실험방법은 다음과 같다.

- (1) 길이 측정용 틀은 공시체를 측정할 때와 같은 상태로 정치한다.
- (2) 표준자 한쪽 플러그에 길이 측정용 틀의 접점을 접촉시켜, 다이얼 게이지의 스피들 끝이 표준자의 축에 일치해서 움직이도록 하여, 스피들을 서서히 표준자의 다른 한쪽에 접촉시켜 다이얼 게이지 눈금을 읽는다. 스피들을 빼내어 다시 위 조작을 반복하고 2회째 이후의 눈금을 읽은 것을 평균하여  $x_{i1}$ 로 한다.
- (3) 공시체에 대해서 같은 조작을 반복하여, 다이얼 게이지 눈금을 읽은 것을 평균값을  $x_{i2}$ 로 한다.

그림 3.14는 길이변화 측정기(다이얼 게이지법)이며, 그림 3.15는 길이변화 실험의 공시체이며 양쪽 끝 부분에 게이지 플러그를 부착시킨 것을 확인할 수 있다.

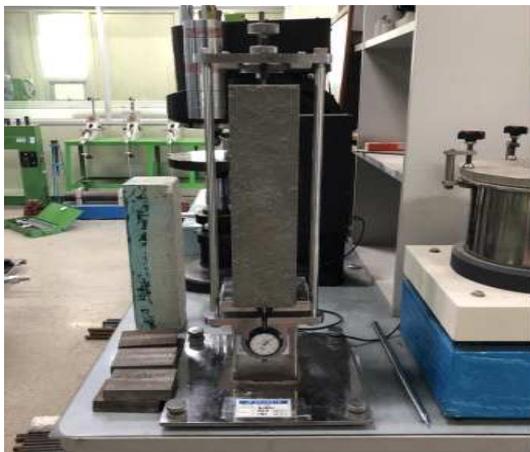


그림 3.14 길이변화 측정기



그림 3.15 길이변화 공시체

### 3.3.4 동결융해에 대한 저항성 실험

콘크리트의 동결융해 실험은 「KS F 2456 급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법」에 따라 A방법으로 진행하였으며, A방법은 그림 3.16과 같은 동결융해 시험기에 그림 3.17과 같이 공시체의 주위 3mm 정도가 완전히 물에 둘러싸여 있어야 하며 공시체는 고무튜브 속에 넣어진 상태에서 실험을 하여야한다. 또한 시험조 내에서는 가열액 및 냉각액을 온도차가 3.3℃ 이내로 되도록 순환시켜야하며, 공시체의 온도를 1℃ 이내로 측정할 수 있는 온도측정 장치를 사용했다.

동결융해 1사이클은 공시체 중심부의 온도를 원칙으로 하여 4℃에서 -18℃로 떨어지고, 다시 4℃로 상승되는 것으로 하였다. 각 사이클에서 중심부의 최고 및 최저 온도는 (4±2)℃ 및 (-18±2)℃의 범위에 있어야 하고, 중심부의 온도가 -20℃ 이하 또는 6℃ 이상이 되어서는 안되며. 동결 융해 1사이클의 소요 시간은 2시간 이상, 4시간 이하로 하였다.

팽창성 동해의 척도인 동탄성계수는 각 공시체 마다 동결 융해 시험 시작 전에 초기 36사이클 이전, 200사이클 두 가지로 실시하였다.



그림 3.16 동결융해 시험기



그림 3.17 동결융해 시험기 내부 공시체

배합조건에 따른 동결융해에 대한 저항성 실험의 공시체는 그림 3.18과 같으며, 동탄성계수 측정방법은 「KS F 2437 공명 진동에 의한 콘크리트의 동탄성 계수 및 동 푸아송비의 시험방법」에 준하여 그림 3.19와 같이 측정하였다.



그림 3.18 동결융해 시험 공시체



그림 3.19 동탄성계수 측정기 및 측정

### 3.3.5 표면박리 실험

표면박리는 제설제로 인한 부식과 동결융해 반복으로 인한 물리적 손상으로 보고 있으며, 본 연구에서 「KS F 2456 급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법」에 따라 B방법으로 진행하였다. 그림 3.20과 같이 동결융해의 B방법은 A방법과 다르게 공시체에 지지 장치를 설치하여 그 안에 5% 염화칼슘 희석액을 넣어 동결 단계시 공기중 냉기로 열리고 융해 단계시 수중에 녹이는 방법이다. 이에 따라 그림 3.21은 액체를 담기위한 공시체에 아크릴 지지대를 부착하여 액체를 넣는 모습이며, 그림 3.22와 같이 액체를 넣은 공시체는 랩핑 후 동결융해 시험기에 넣었으며, 동결융해 후 부피 손실 등급 평가와 표면의 시각 등급평가 실시하였다.



그림 3.20 표면박리 실험방법



그림 3.21 염화칼슘 희석액 투입



그림 3.22 동결융해 시험기 내부 공시체

### 3.4 파일럿 규모 공시체 실험

본 연구에서는 잔골재의 대체재로 부순모래를 사용하였을 때 현장 적용성을 판단하기 위해 파일럿 규모 공시체 실험을 실시하였다. 표준 공시체 실험을 바탕으로 파일럿 규모 공시체 실험에서도 비슷한 결과를 나타내는지 확인하기 위해 S사 부순모래를 사용하였으며, 그림 3.23과 같이 공정을 마친 부순모래를 호퍼에서 채취하여, 체가름 시험을 실시하였다. 그림 3.24는 체가름 시험을 통한 계량 값과 계량 값에 따른 입도분포곡선이다.



그림 3.23 레미콘 회사 호퍼 부순모래 공정

파일럿 실험				계량값	702.4
체치수 (mm)	체통과율(%)		누적잔유량 (%)	통과율 (%)	각 체 계량값 (g)
	하한	상한			
10	100	100	0	100	0.0
5	90	100	1.00	99.00	7.0
2.5	80	100	27.62	72.38	187.0
1.2	50	90	52.45	47.55	174.4
0.6	25	65	69.56	30.44	120.2
0.3	10	35	75.67	24.33	42.9
0.15	2	15	84.78	15.22	64.0
미분			100	0	106.9
계		FM	3.11		702.4

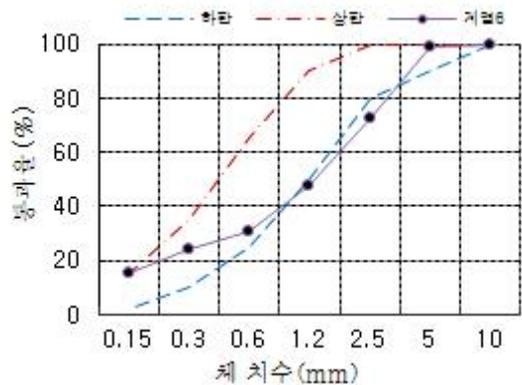


그림 3.24 파일럿 규모 공시체 실험 체가름 골재 계량

표 3.5는 시방배합내용(1000L)이며, 파일럿 규모 공시체 실험에 사용된 공시체는 표준 공시체 실험과 마찬가지로 W/C, S/a, 부순모래 및 굵은골재의 무게를 동일하게 하였다. 골재생산 회사의 공정을 마친 부순모래는 미립자가 많이 생기므로 미립자 함유량에 따른 콘크리트에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 레미콘 회사에서 취급하는 부순모래의 미립자 함유량은 잔골재의 무게에 약 15%였다. 이와 같은 미립자 함유량에 혼화제 사용량을 0.70%, 0.85%, 1.00%를 각각 사용하였다. 레미콘 회사 호퍼의 부순 모래는 건조 되지 않은 골재이며, 함수비를 포함하고 있다. 그러므로 현장수정배합이 필요하며 표 3.6은 현장 수정 배합내용(1000L)이다.

파일럿 규모 공시체 실험은 슬럼프, 공기량, 압축강도, 동결융해에 대한 저항성 실험만 실시하였으며, 실험 방법은 앞서 실시한 표준 공시체 실험과 동일하다.

**표 3.5 시방 배합 내용(1000L)**

구 분	W/C (%)	S/a (%)	재 료 량(kg)					비 고 (혼화제 사용량)
			W	C	S	G	AD	
P-AD70	52.0	47.3	175	337	828	929	2.36	0.70%
P-AD85	52.0	47.3	175	337	828	929	2.86	0.85%
P-AD100	52.0	47.3	175	337	828	929	3.37	1.00%

**표 3.6 현장 수정 배합 내용(1000L)**

구 분	W/C (%)	S/a (%)	재 료 량(kg)					비 고 (혼화제 사용량)
			W	C	S	G	AD	
P-AD70	52.0	47.3	164	337	787	981	2.36	0.70%
P-AD85	52.0	47.3	164	337	787	981	2.86	0.85%
P-AD100	52.0	47.3	164	337	787	981	3.37	1.00%

## 제 4 장 실험 결과 분석

### 4.1 표준 공시체 실험

#### 4.1.1 슬럼프·공기량 실험 결과 분석

##### 1) 슬럼프 실험

슬럼프 실험은 콘크리트의 유동성을 측정하여 워커빌리티를 알아보기 위함이다. 반죽의 정도를 결정하는 것은 물의 양이며, 표 4.1은 콘크리트 시방서에서 규제하는 슬럼프의 허용차이며, 본 연구에서의 허용범위는 125~175mm이다.

**표 4.1 슬럼프의 허용 차(국토교통부, 콘크리트 표준 시방서, 2016)**

슬럼프(mm)	허용 차(mm)
25	± 10
50 및 65	± 15
80 이상	± 25

표 4.2는 슬럼프 실험결과이며, FP22-AD70의 경우 반죽이 매우 된 상태를 보이며, 펌프카의 압송도 힘들다고 판단된다. FP0-AD70과 FP2-AD70 공시체의 경우 반죽이 묽은 것으로 보아 재료분리가 있었다고 판단된다. 그리고 슬럼프가 큰 콘크리트를 사용하면 작업은 용이하나 블리딩이 많아지고 모르타르로부터 분리되는 경향이 심하다고 판단된다. 나머지 FP7-AD70, FP15-AD70, FP22-AD85, FP22-AD100 공시체는 허용범위에 속하였으며 좋은 작업성을 나타냈다. 동일한 물의 양이지만 이러한 오차가 생긴 원인으로는 미립자 함유량과 혼화제 사용량이 슬럼프에 영향을 준다고 판단된다.

**표 4.2 슬럼프 실험 결과 값**

배 합	FP0 -AD70	FP2 -AD70	FP7 -AD70	FP15 -AD70	FP22 -AD70	FP22 -AD85	FP22 -AD100
슬럼프(mm)	200	220	170	160	110	150	170

2) 공기량 실험

공기량 실험은 콘크리트 속 기포가 시간이 경과함에 따라 작은 기포가 모여 큰 기포로 변화하기에 안정적인 기포를 만들어 워커빌리티를 알아보기 위함이다. 공기량의 영향을 주는 요인으로서는 공기 연행제이며, 표 4.3은 콘크리트 시방서에서 규제하는 공기량의 허용 오차며, 본 연구에서의 공기량 실험의 허용범위는 3~6%이다.

**표 4.3 공기량 허용 오차(국토교통부, 콘크리트 표준 시방서, 2016)**

콘크리트의 종류	공기량(%)	공기량의 허용오차(%)
보통 콘크리트	4.5	±1.5
경량 콘크리트	5.5	
포장 콘크리트	4.5	
고강도 콘크리트	3.5	

표 4.4와 같이 공기량 실험결과 FP0-AD70 공시체 4.1%, FP2-AD70 공시체 5.0%, FP7-AD70 공시체 5.6%, FP15-AD70 공시체 5.2%, FP22-AD70 공시체 3.8%, FP22-AD85 공시체 4.2% 마지막으로 FP22-AD100 공시체 4.7%로 모든 공시체가 허용범위에 속하고 있다. 이처럼 공기를 함유한 콘크리트는 함유하지 않은 콘크리트보다 수밀성이 낮지만, W/C의 감소효과로 인해 적정 공기량을 가질 때와 비교할시 수밀성의 차이가 거의 없으며, 공기량 1% 증가시 강도는 4~6% 정도 감소하나, 워커빌리티의 개선으로 단위수량 및 W/C가 줄어들어 강도 감소가 상쇄되며 오히려 증가 할 수 있다고 판단된다.

**표 4.4 공기량 실험 결과 값**

배 합	FP0 -AD70	FP2 -AD70	FP7 -AD70	FP15 -AD70	FP22 -AD70	FP22 -AD85	FP22 -AD100
공기량(%)	4.1	5.0	5.6	5.2	3.8	4.2	4.7

### 3) 미립자 함유량에 따른 영향 분석

그림 4.1과 같이 미립자 함유량에 따른 슬럼프 실험 결과 미립자 함유량이 감소할수록 슬럼프는 커지는 경향을 보이고 있다. 하지만 FP0-AD70 공시체의 경우 미립자가 존재하지않아 골재의 접촉면에 미끌림이 부족하고 인터로킹 현상으로 인해 슬럼프에 영향을 받아 낮아졌다고 판단이 된다. 공기량은 입도 0.3~0.15mm의 영향을 많이 받는다. 따라서 미립자 함유량이 증가함에 따라 0.3~0.15mm 부분의 입도의 양도 증가하면서 공기량이 FP22-AD70 공시체가 가장 크게 나올 것으로 예상하였으나, 그림 4.2와 같이 FP22-AD70 공시체는 가장 작게 나타났다. 이는 미립자 함유량이 많아짐에 따라 0.3~0.15mm 부분의 효과를 감소시킨 것으로 판단된다.

### 4) 혼화제 사용량에 따른 영향 분석

그림 4.3과 같이 혼화제 사용량에 따른 슬럼프값 비교결과 혼화제 사용량이 증가할수록 슬럼프의 높이는 커지는 추이를 보이고 있다. 그림 4.4와 같이 혼화제 사용량에 따른 공기량의 값은 공기연행제인 고성능 AE감수제의 영향을 받아 사용량이 가장 많은 FP22-AD100이 가장 크게 나타났다.

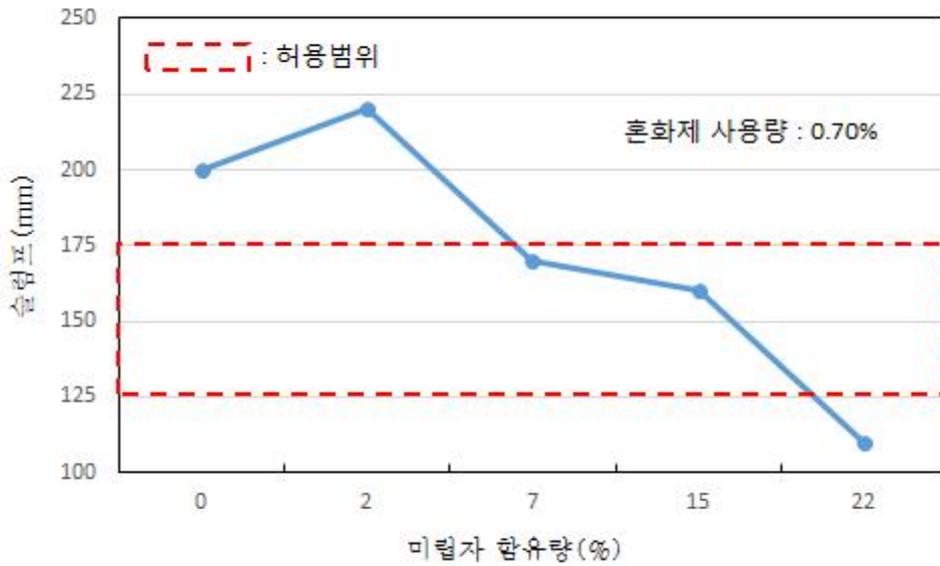


그림 4.1 미립자 함유량에 따른 슬럼프 실험결과

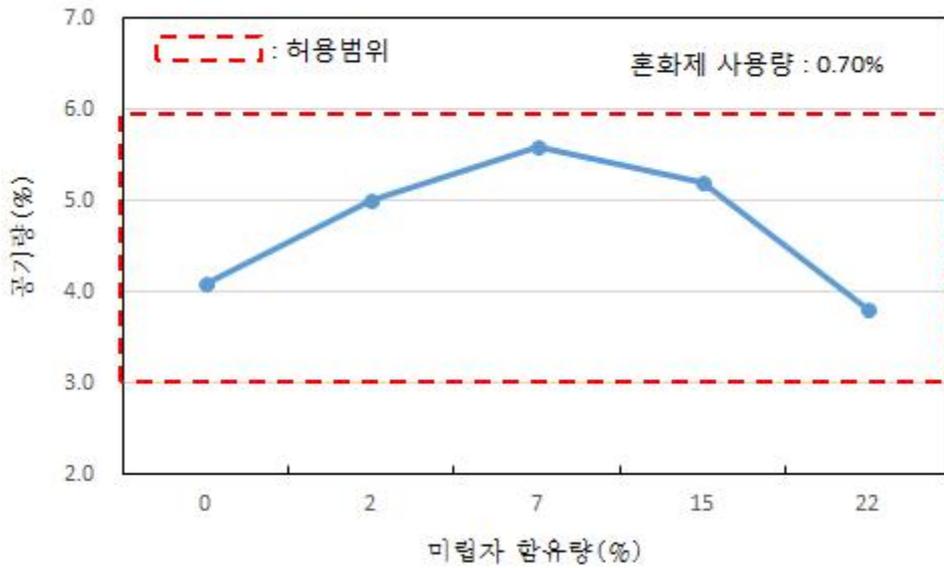


그림 4.2 미립자 함유량에 따른 공기량 실험결과

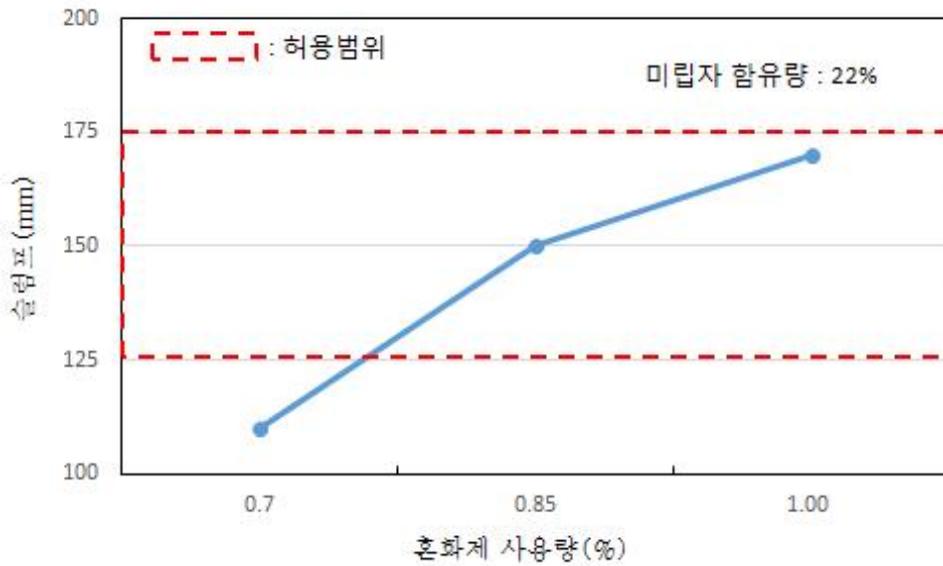


그림 4.3 혼화제 사용량에 따른 슬럼프 실험결과

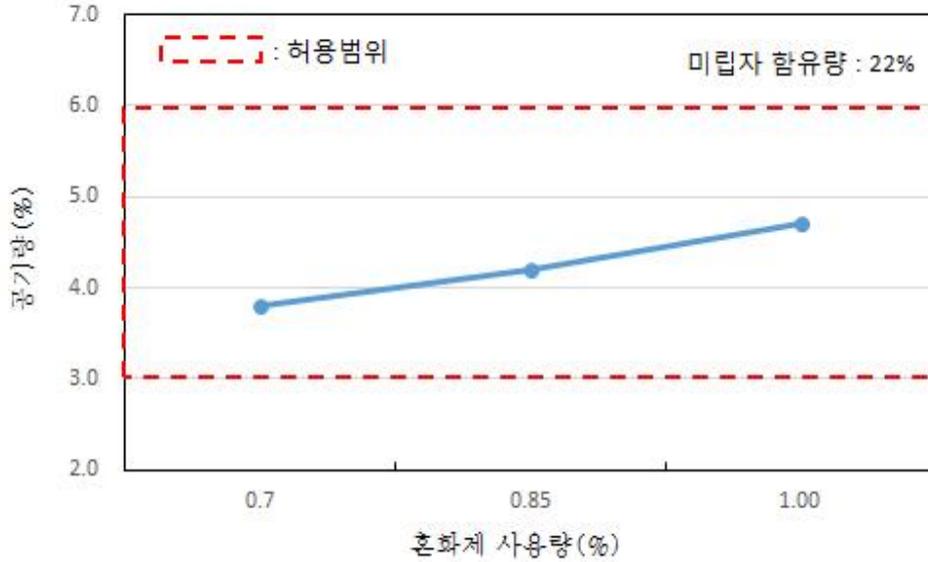


그림 4.4 혼화제 사용량에 따른 공기량 실험결과

### 4.1.2 압축강도 실험 결과 분석

압축강도의 값은 공시체의 지름은 0.1mm, 높이는 1mm까지 측정하였으며, 식 (4.1)에 따라 산출하여 유효 숫자 3자리로 산출하였고, 그 값은 표 4.5와 같다. 배합조건이 서로 다른 각각의 공시체에 관하여 3일, 7일, 28일 강도를 3회 측정한 평균값이다.

$$f_c = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad (4.1)$$

여기에서  $f_c$  : 압축 강도(MPa)

$P$  : 공시체가 파괴될 때까지 시험기가 나타내는 최대 하중(N)

$A$  : 공시체가 파괴될 때까지 시험기가 나타내는 최대 하중(N)

표 4.5는 압축강도의 결과 값이다. 3일의 최대 압축강도는 FP22-AD100 공시체는 25.344MPa로 가장 크게 나왔으며, FP0-AD70 공시체가 21.591MPa는 가장 작게 나왔다. 7일의 최대 압축강도는 FP22-AD100 공시체는 32.363MPa로 가장 크게 나타났으며, FP2-AD70 공시체는 29.603MPa로 가장 작게 나타났다. 28일의 압축강도에서도 FP22-AD100 공시체가 39.377MPa로 가장 높게 나타났으며, FP0-AD70 공시체가 35.983MPa로 가장 낮게 나왔다.

**표 4.5 압축강도 결과 값**

배 합	압축강도(MPa)		
	3일	7일	28일
FP0-AD70	21.591	29.684	35.983
FP2-AD70	21.839	29.603	36.176
FP7-AD70	22.613	29.883	36.685
FP15-AD70	22.878	30.487	37.582
FP22-AD70	23.325	30.494	37.944
FP22-AD85	24.422	31.552	38.709
FP22-AD100	25.344	32.363	39.377

### 1) 미립자 함유량에 따른 영향 분석

동일한 W/C일 때 기존 연구결과에서는 압축강도가 비슷하게 나오는 추세를 보였다. 하지만 본 연구에서는 동일한 W/C임에도 불구하고, 압축강도의 차이를 보였다. 그림 4.5는 미립자 함유량에 따른 압축강도 결과를 나타낸 그래프이다. FP0-AD70, FP2-AD70, FP7-AD70, FP15-AD70, FP22-AD70 공시체 순으로 3일 강도는 21.591MPa, 21.839MPa, 22.613MPa, 22.878MPa, 23.325MPa 으로 FP22-AD70 공시체가 가장 큰 결과 보였으며, FP0-AD70 공시체가 가장 작은 결과를 보였다. 28일 강도에서는 35.983MPa, 36.176MPa, 36.658MPa, 37.582MPa, 37.944MPa으로 FP22-AD70 공시체가 가장 큰 결과를 보였으며, FP0-AD70 공시체가 가장 작은 결과를 보였다.

부순 모래의 미립자 함유량이 증가할수록 강도가 증가하는 결과를 나타냈다. 하지만 골재의 미립자는 콘크리트의 단위 수량을 증가시키고 강도또는 내구성을 저하시킨다는 연구결과도 존재하였다. 이와같은 근거로 볼 때, 동일한 슬럼프로 조정하여 작업할 경우 FP7-AD70 공시체가 가장 큰 압축강도를 얻을 것이라고 예상되며, FP22-AD70 공시체의 압축강도가 가장 작을 것이라고 예상된다.

### 2) 혼화제 사용량에 따른 영향 분석

그림 4.6는 혼화제 사용량에 따른 압축강도 결과를 나타낸 그래프이다. FP22-AD70, FP22-AD85, FP22-AD100 공시체 순서대로 3일 강도는 23.325MPa, 24.422MPa, 25.344MPa으로 FP22-AD100 공시체가 가장 큰 결과를 보였으며, FP22-AD70 공시체가 가장 작은 결과를 보였다. 28일 압축강도 결과는 37.582MPa, 38.709MPa, 39.377MPa으로 마찬가지로 FP22-AD100 공시체가 가장 큰 결과를 보였으며, FP22-AD70 공시체가 가장 작은 결과를 보였다. 혼화제의 사용량이 증가하면 압축강도가 커진다는 기존 연구결과와 같이 본 연구에서도 0.70%, 0.85%, 1.00%로 혼화제의 사용량이 증가할수록 강도가 커지는 것을 확인하였다.

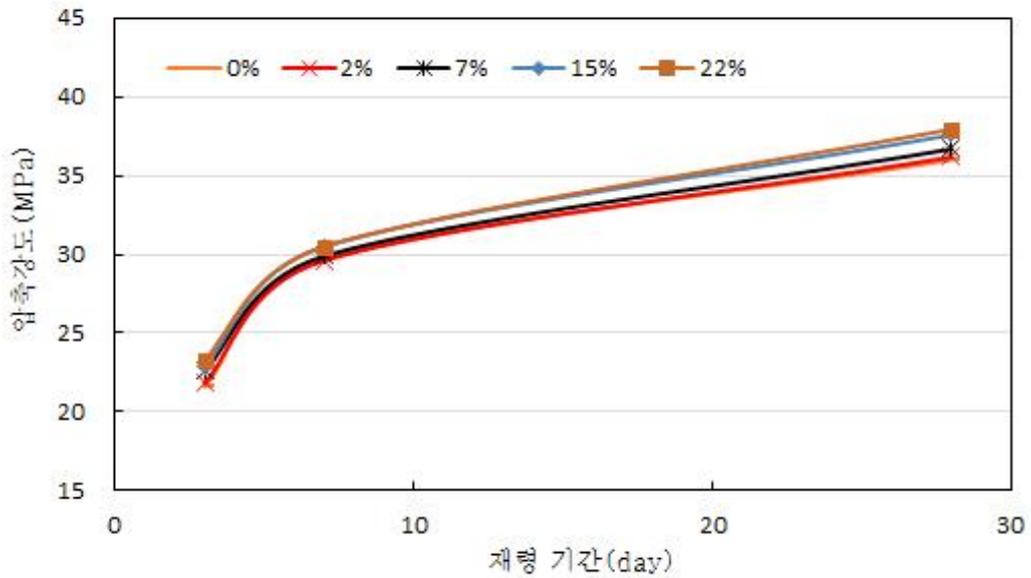


그림 4.5 미립자 함유량에 따른 압축강도 실험결과

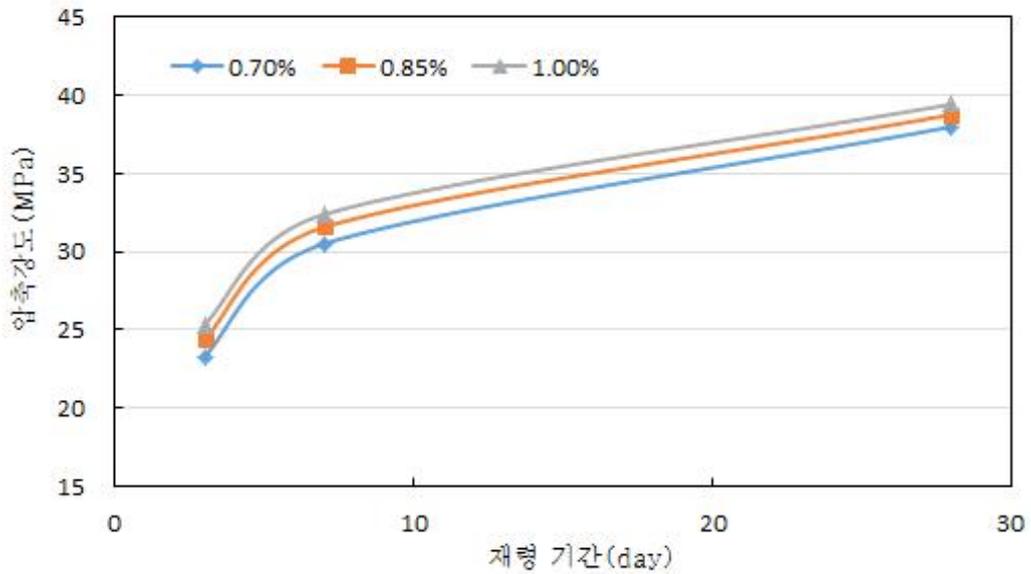


그림 4.6 혼화제 사용량에 따른 압축강도 실험결과

### 4.1.3 길이변화율 실험 결과 분석

공시체의 길이변화의 값은 용적변화가 생긴 것을 확인할 목적이다. 6개의 배합조건에 따라 공시체를 2개씩 제작하여 1주, 4주, 8주, 3개월의 기간 동안  $10^{-3}$ mm까지 측정을 하여 평균을 냈으며, 그 결과 값은 표 4.6과 같다.

**표 4.6 길이 변화량 측정 평균 값**

배 합	길이 변화량(mm)			
	1주	4주	8주	3개월
FP0-AD70	-0.155	-0.203	-0.237	-0.279
FP2-AD70	-0.150	-0.194	-0.235	-0.272
FP7-AD70	-0.143	-0.193	-0.227	-0.265
FP15-AD70	-0.106	-0.148	-0.182	-0.222
FP22-AD70	-0.064	-0.096	-0.132	-0.194
FP22-AD85	-0.050	-0.087	-0.124	-0.182

이와 같은 결과 값을 식 (4.2)에 따라 길이변화율을 산출하였고, 그 값은 표 4.5와 같다.

$$\text{길이 변화율(\%)} = \frac{(x_{01} - x_{02}) - (x_{i1} - x_{i2})}{L_o} \times 100 \quad (4.2)$$

여기에서  $L_o$  : 기준 길이

$x_{01}, x_{02}$  : 각각 기준으로 한 시점에서의 측정치

$x_{i1}, x_{i2}$  : 각각 시점 i에서의 측정치

공시체의 길이변화율은 1주 0.012%, 4주 0.021%, 8주 0.030%, 3개월에서 0.043%로 FP22-AD85 공시체가 가장 작게 나타났으며, 1주 0.037%, 4주 0.048%, 8주 0.056%, 3개월에서 0.066%인 FP0-AD70 공시체가 가장 크게 나타났다. 미립자 함유량이 증가함에 따라 단위수량 증가로 인한 길이변화율이 크다는 연구결과도 있었지만, 본 연구에서는 미립자 함유량이 증가함에 따라 길이변화율이 더 작게 나타났음을 확인되었다.

**표 4.7 길이 변화를 측정 값**

		길이 변화율(%)			
배합	재령	1주	4주	8주	3개월
		FP0-AD70	0.037	0.048	0.056
	FP2-AD70	0.036	0.046	0.056	0.065
	FP7-AD70	0.034	0.046	0.054	0.063
	FP15-AD70	0.025	0.035	0.043	0.053
	FP22-AD70	0.015	0.023	0.031	0.046
	FP22-AD85	0.012	0.021	0.030	0.043

#### 1) 미립자 함유량에 따른 영향 분석

그림 4.7과 같이 미립자 함유량에 따른 길이 변화율에 대한 분석결과 1주부터 3개월 까지 FP22-AD70 공시체가 가장 작은 길이변화율을 나타내며, FP0-AD70 공시체가 가장 높은 길이변화율을 보인다. 이는 미립자 함유량이 증가할수록 길이변화율이 작아지는 추이를 나타낸다. FP22-AD70 공시체와 FP0-AD70 공시체의 3개월의 재령기간동안 4주와 8주의 0.025%의 높은 차를 보였지만, FP22-AD70 공시체의 3개월 재령기간 동안의 급격한 변화가 생겼으며, 0.020%의 차를 보이고 있다. 압축강도 실험과 동일하게 동일한 슬럼프로 조정하여 작업하였을 때, FP7-AD70 공시체가 가장 작은 길이변화율을 얻을 것이라고 예상되며, FP22-AD70 공시체의 길이변화율 가장 클 것으로 예상된다.

#### 2) 혼화제 사용량에 따른 영향 분석

그림 4.8은 혼화제 사용량에 따른 길이 변화율에 대한 분석결과이며, 혼화제 사용량이 증가할수록 길이변화율은 작아지는 추이를 나타낸다.

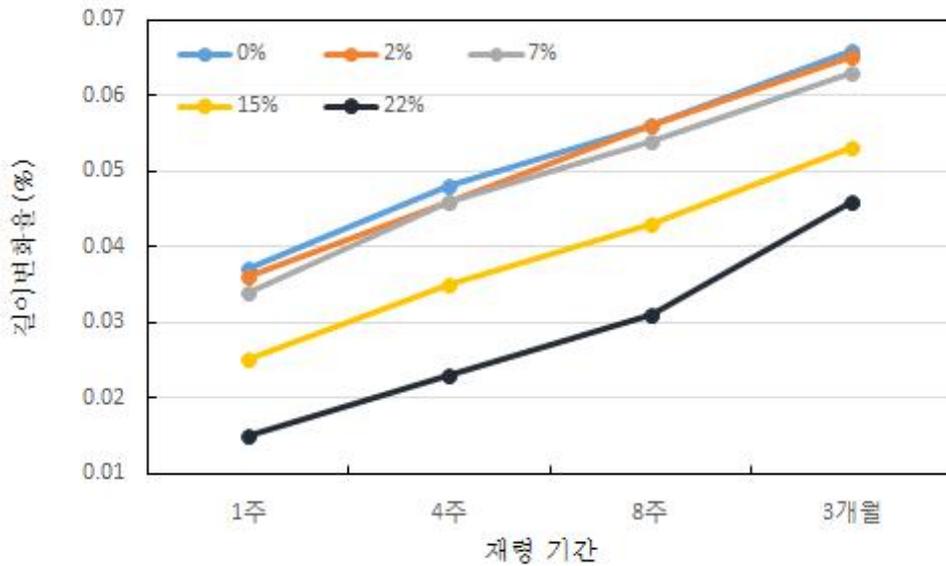


그림 4.7 미립자 함유량에 따른 길이변화율 실험결과

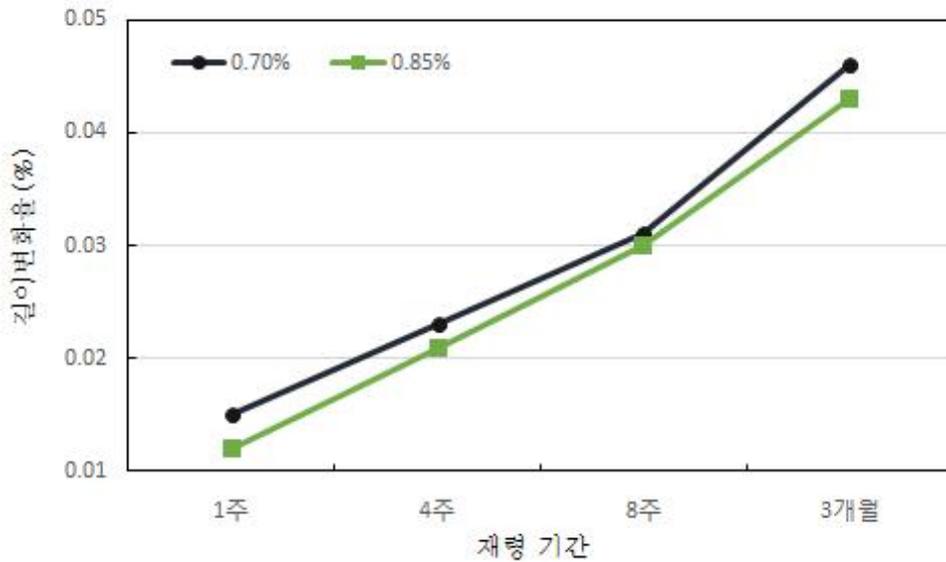


그림 4.8 혼화제 사용량에 따른 길이변화율 실험결과

#### 4.1.4 동결융해에 대한 저항성 실험 결과 분석

표 4.8은 동결융해에 대한 저항성 실험에 대한 6개의 배합조건의 공시체를 2개씩 제작하여 공명진동수(Hz)를 나타낸 값이며, FP7-AD70 공시체의 공명진동수의 감소량이 제일 작았으며, FP0-AD70 공시체의 공명진동수의 감소량이 가장 크게 나타났다. 36사이클 이전 공명진동수와 200사이클 공명진동수를 통해 식 (4.3)으로 상대동탄성계수를 산출하였다.

표 4.8 공명진동수(Hz) 측정값

구 분 사이클(Hz)	FP0-AD70		FP2-AD70		FP7-AD70	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
36 사이클 이전	4996	4947	5046	4972	4899	4875
200 사이클	4827	4827	4875	4899	4780	4947
구 분 사이클(Hz)	FP15-AD70		FP22-AD70		FP22-AD85	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
36 사이클 이전	4947	4972	4923	4947	4996	4972
200 사이클	4780	4923	4804	4899	4780	4851

$$P_c = \left(\frac{n_c^2}{n_0^2}\right) \times 100 \quad (4.3)$$

여기에서  $P_c$  : 동결융해 200사이클 후의 상대 동 탄성 계수(%)

$n_0$  : 동결융해 36사이클 이전의 변형 진동의 1차 공명 진동수(Hz)

$n_c$  : 동결융해 200사이클 후의 변형 진동의 1차 공명 진동수(Hz)

표 4.9는 동결융해의 진행이 반복되며 무게 감소량과 앞서 계산한 상대동탄성계수의 값을 평균을 산출한 값이다. 상대동탄성계수는 80%이상으로 규제하고 있으며, 배합에 따른 상대동탄성계수는 규제이상으로 나타났다. 동결융해에 대한 저항성은 공기량과의 밀접한 연관이 있으며, 공기량 시험 결과값이 제일 큰 FP7-AD70의 공시체의 상대동탄성계수 가장 큰 결과를 보였다.

표 4.9 동결융해에 대한 저항성에 대한 무게 감소량 및 상대동탄성계수

배 합	FP0 -AD70	FP2 -AD70	FP7 -AD70	FP15 -AD70	FP22 -AD70	FP22 -AD85
무게감소량(g)	410.5	316	70.5	86.5	72.5	68.5
상대동탄성계수(%)	94.3	95.2	97.1	95.7	96.6	98.5

표 4.10은 동결융해에 대한 저항성 실험 전후의 공시체 표면변화를 비교하였으며, 동결융해로 인한 표면의 변화를 나타낸다.

표 4.10 동결융해에 대한 저항성 실험 공시체 표면 변화

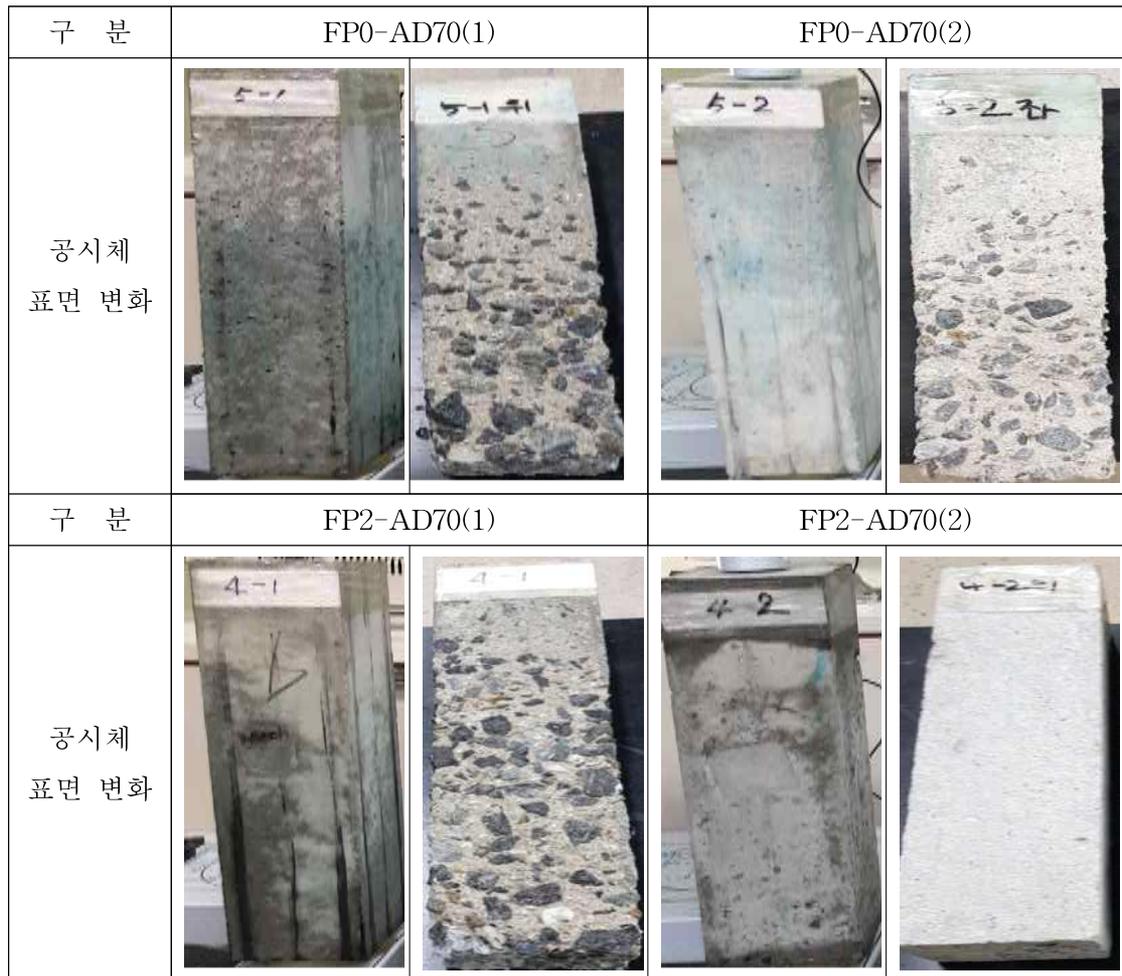


표 4.10 계속

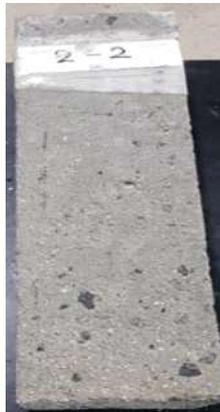
구 분	FP7-AD70(1)		FP7-AD70(2)	
공시체 표면 변화				
구 분	FP15-AD70(1)		FP15-AD70(2)	
공시체 표면 변화				
구 분	FP22-AD70(1)		FP22-AD70(2)	
공시체 표면 변화				

표 4.10 계속

구 분	FP22-AD85(1)		FP22-AD85(2)	
공시체 표면 변화				

1) 미립자 함유량에 따른 영향 분석

미립자 함유량에 따른 동결융해에 대한 저항성 분석결과 무게감소량은 FP7-AD70 공시체가 70.5g으로 가장 작은 결과를 나타냈으며, FP0-AD70 공시체가 410.5g으로 가장 큰 결과를 나타냈다. 무게 감소량과 동일하게 FP7-AD70 공시체가 97.1%로 가장 큰 결과를 나타냈으며, FP0-AD70 공시체가 94.3%로 가장 작은 결과를 보였다. FP22-AD70 공시체의 공기량이 가장 낮아 동결융해에 대한 저항성이 가장 좋지 않다고 판단되었으나, FP0-AD70 공시체와 FP2-AD70 공시체가 FP22-AD70 공시체보다 재료분리가 심하게 나타난 결과 더욱 낮은 결과를 나타냈다고 판단된다.

2) 혼화제 사용량에 따른 영향 분석

혼화제 사용량에 따른 동결융해에 대한 저항성 분석결과 혼화제 사용량이 증가할수록 무게감소량과 상대동탄성계수는 커지는 추이를 나타낸다. 이러한 추이로 보았을 때, 본 연구의 사용한 혼화제에 사용량에 따른 동결융해에 대한 저항성에 좋은 효과를 나타낸다고 판단된다.

### 4.1.5 표면박리 실험 결과 분석

표 4.11은 제빙염에 노출된 콘크리트 표면의 동결융해에 의한 표면박리 실험을 수행한 결과를 나타낸 것이며, FP22-AD70 공시체의 24.0g 감소량이 가장 크게 나타났으며, FP22-AD85 공시체의 1.2g 감소량이 가장 작게 나타났다. 동결융해가 끝난 표면박리에 의한 부피 손실이  $1\text{kg}/\text{m}^2$ 을 초과하지 않는다면 표면박리 저항성에 충분한 콘크리트라고 평가하고 있으며, 본 연구의 실험의 결과값은 기준에 속한다. 표 4.12를 기준으로 부피 손실로 평가해 보았을 때 FP7-AD70, FP15-AD70, FP22-AD70 공시체는 좋은 등급이라고 판단되며, FP0-AD70, FP2-AD70, FP22-AD85 공시체는 매우 좋은 등급에 속한다고 판단된다. 또한 실험 후 표면을 시각 등급으로 평가했을 때 표 4.13을 참고하여, 표 4.14를 비교결과 FP15-AD70과 FP22-AD70 공시체는 2등급 FP2-AD70, FP0-AD70 공시체는 1등급, FP0-AD70, FP22-AD85는 0등급으로 모든 공시체가 우수한 결과를 보였다.

**표 4.11 표면박리 실험 결과 값**

배 합	FP0 -AD70	FP2 -AD70	FP7 -AD70	FP15 -AD70	FP22 -AD70	FP22 -AD85
실험 전 무게(g)	6098.9	6310.2	6044.3	5787.4	5843.0	5978.9
실험 후 무게(g)	6097.2	6308.3	6036.3	5763.7	5819.0	5977.7
무게감소량(g)	1.7	2.9	8.0	13.7	24.0	1.2
부피손실( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	0.034	0.058	0.160	0.274	0.480	0.024

**표 4.12 부피 손실에 따른 등급**

Condition of Surface	
Very good	동결융해 후 표면박리 손실이 $0.1\text{kg}/\text{m}^2$ 미만인 경우
Good	동결융해 후 표면박리 손실이 $0.5\text{kg}/\text{m}^2$ 미만인 경우
Acceptable	동결융해 후 표면박리 손실이 $1.0\text{kg}/\text{m}^2$ 미만인 경우
Unacceptable	동결저항성을 만족하는 조건에 적합하지 않는 경우

표 4.13 표면의 시각 등급

Rating	Condition of Surface
0	No Scaling
1	Very light Scaling (no coarse aggregate visible)
2	Slight to moderate Scaling
3	Moderate Scaling (some coarse aggregate visible)
4	Moderate to severe Scaling
5	Severe Scaling (coarse aggregate visible over entire surface)

표 4.14 표면박리(중량감소법) 실험 공시체 표면 변화

구 분	FP0-AD70		FP2-AD70	
공시체 표면변화				
구 분	FP7-AD70		FP15-AD70	
공시체 표면변화				
구 분	FP22-AD70		FP22-AD85	
공시체 표면변화				

1) 미립자 함유량에 따른 영향 분석

그림 4.9와 같이 미립자 함유량에 따른 FP0-AD70부터 FP22-AD70까지 공시체의 무게 감소량 비교 결과 FP22-AD70 공시체 24.0g, FP15-AD70 공시체 13.7g, FP7-AD70 공시체 8.0g, FP2-AD70 공시체 2.9g, FP0-AD70 공시체 1.7g으로 미립자 함유량이 증가할수록 무게 감소량이 크게 나타났다. 이는 미립자 함유량이 증가함에 따라 콘크리트 속 자갈이 침하되지 않아 피막층이 얇게 형성되며 FP22-AD70 공시체는 이러한 현상으로 무게감소량이 가장 크고, FP0-AD70 공시체는 재료분리가 심하여 피막층이 두껍게 형성되는 것으로 판단되어 무게 감소량이 작게 나타났다고 판단된다.



그림 4.9 미립자 함유량에 따른 표면박리 무게감소량

2) 혼화제 사용량에 따른 영향 분석

그림 4.10과 같이 혼화제 사용량에 따른 표면박리 분석결과 FP22-AD70 공시체가 24g, FP22-AD85 공시체가 1.2g으로 22.8g의 큰 차를 보인다. 이는 혼화제의 이용에 따라 슬럼프 높이에도 차이를 보이는 것을 보아 혼화제 사용량이 증가함에 따라 콘크리트가 안정되어 박리의 현상을 막아주었다고 판단된다.

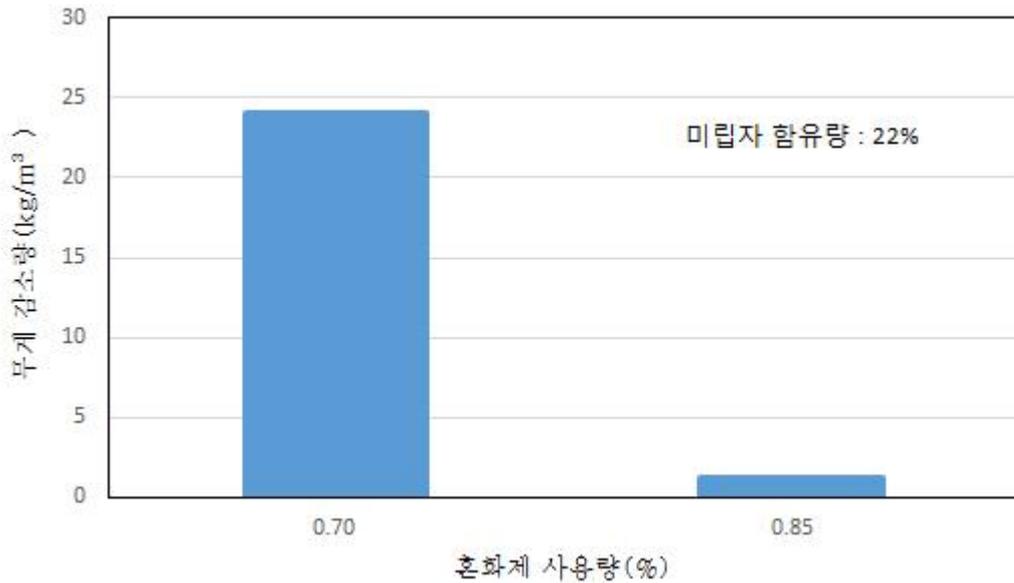


그림 4.10 혼화제 사용량에 따른 표면박리 무게감소량

## 4.2 파일럿 규모 공시체 실험 결과

### 4.2.1 슬럼프·공기량 실험 결과 분석

표 4.15와 같이 슬럼프와 공기량 실험결과 P-AD70, P-AD85, P-AD100의 슬럼프·공기량 값은 허용범위에 속하였다. 슬럼프 실험의 경우 그림 4.11과 같이 P-AD70 공시체는 130mm, P-AD85 공시체는 140mm, P-AD100 공시체는 165mm로 혼화체의 사용량이 증가할수록 슬럼프의 높이가 커지는 것으로 판단된다. 실내 실험과 마찬가지로 동일한 물의 양이지만 이러한 오차가 생긴 원인으로는 혼화체의 사용량이 슬럼프에 영향을 준다고 판단된다.

공기량 실험결과는 그림 4.12과 같이 P-AD70 공시체 3.2%, P-AD85 공시체 3.5%, P-AD100 공시체 4.0%로 나타났으며, 혼화제 사용량에 따른 공기량의 값은 공기연행제인 고성능 AE감수제의 영향으로 공기량이 커졌다고 판단된다.

**표 4.15 파일럿 규모 슬럼프·공기량 실험 결과 값**

배합	P-AD70	P-AD85	P-AD100
슬럼프(mm)	130	140	165
공기량(%)	3.2	3.5	4.0

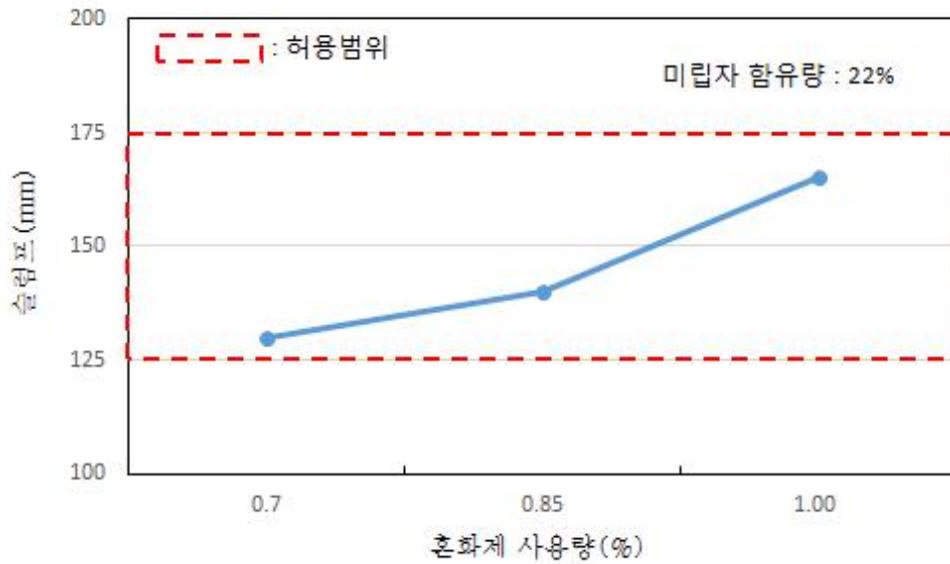


그림 4.11 파일럿 규모 슬럼프 실험결과

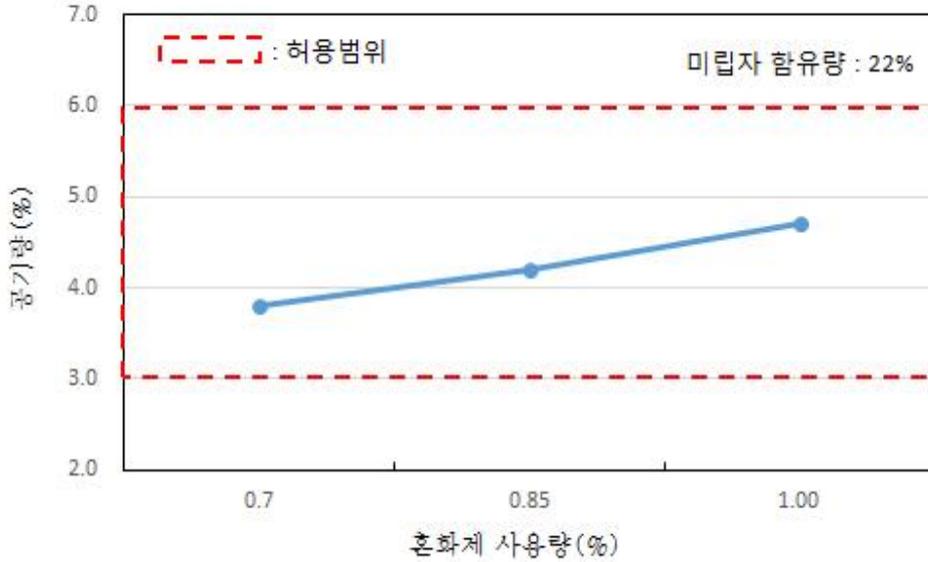


그림 4.12 파일럿 규모 공기량 실험결과

#### 4.2.2 압축강도 실험 결과 분석

표 4.16는 현장 타설 실험의 압축강도의 결과 값이다. 3일의 최대 압축강도는 P-AD100 공시체가 16.050MPa로 가장 크게 나왔으며, P-AD70 공시체가 14.608MPa로 가장 작게 나왔다. 28일의 압축강도에서도 P-AD100 공시체가 30.262MPa로 가장 크게 나왔으며, P-AD70 공시체가 26.536MPa로 가장 작게 나왔다. 그림 4.13는 현장 타설 실험 압축강도 결과를 나타낸 그래프이며, 실내 실험과 마찬가지로 혼화제의 사용량이 증가할수록 강도가 커지는 것을 확인하였다. 하지만 현장 타설 실험은 표준 공시체 실험보다 품질변동과 공정의 편차가 심하여 표준 공시체 실험 보다 작게 나타났다.

표 4.16 파일럿 규모 압축강도 결과 값

배합	압축강도(MPa)		
	3일	7일	28일
P-AD70	14.608	21.692	26.536
P-AD85	15.205	22.478	27.725
P-AD100	16.050	24.208	30.262

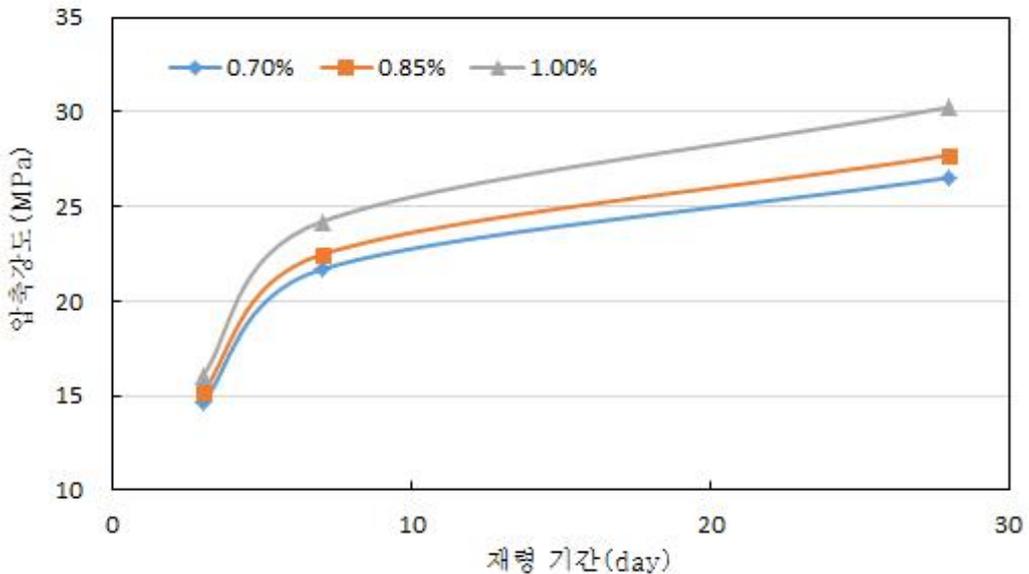


그림 4.13 파일럿 규모 압축강도 실험결과

### 4.2.3 동결응해에 대한 저항성 실험 결과 분석

표 4.17은 현장 타설 실험의 동결응해 실험으로 진행이 반복되며 무게 감소량과 상대동탄성계수의 값을 평균을 산출한 값이며, 앞서 실시한 표준 공시체 실험과 동일하게 상대동탄성계수는 80%이상으로 규제하고 있다. 모든 실험 값은 규제이상으로 나타났으며, 혼화제 사용량이 증가할수록 무게감소량이 작아지고, 상대동탄성계수는 커지는 경향이 나타났다.

**표 4.17 파일럿 규모 동결응해 무게 감소량 및 상대동탄성계수**

공시체 구분	P-AD70	P-AD85	P-AD100
무게감소량(g)	668	335	179
상대동탄성계수(%)	88.4	97.6	98.9

표 4.18 파일럿 규모 동결융해 공시체 표면 변화

구 분	P-AD70(1)		P-AD70(2)	
공시체 표면 변화				
구 분	P-AD85(1)		P-AD85(2)	
공시체 표면 변화				
구 분	P-AD100(1)		P-AD100(2)	
공시체 표면 변화				

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 천연자원의 품귀현상으로 인한 콘크리트의 대체 잔골재로 사용되는 부순모래의 생산과정에서 발생하는 미립자 함유량이 콘크리트 성능에 미치는 영향을 파악하였다. 부순모래의 미립자의 함유량과 고성능 AE감수제 사용량을 달리하여 콘크리트에 미치는 영향을 파악하고 현장 적용성을 검토하였다. W/C(물-시멘트)와 S/a(잔골재율)은 동일하게 하고 부순모래의 미립자의 함유량을 달리한 배합조건인 배합비를 통해 표준 공시체를 제작하여, 슬럼프, 공기량과 압축강도(3, 7, 28일), 길이변화율, 동결융해에 대한 저항성, 표면박리 실험을 실시하여 미립자의 함유량과 고성능 AE감수제 사용량의 영향을 검토하였고, 이를 바탕으로 파일럿 규모 공시체 실험을 통해 현장 적용성을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 슬럼프 측정결과 미립자의 함유량이 감소할수록 슬럼프는 커지는 경향을 보였다. 하지만 미립자 함유량 0%, 혼화제 사용량 0.7%인 FP0-AD70 공시체의 경우 골재의 미끌림이 부족하고 인테로킹현상으로 인해 슬럼프가 작아짐을 확인하였다.
- 2) 공기량 측정결과 미립자의 함유량이 증가할수록 공기량은 커졌다가 다시 작아지는 경향을 보였다. 이것은 미립자의 함유량을 조절할 때 공기량에 가장 영향 많이 주는 입도 0.3~0.15mm부분이 증가하여 공기량이 커졌지만, 미립자의 함유량이 증가하면서 공기량을 작게하는 경향을 실험을 통해 확인하였다. 한편 미립자 함유량이 증가하여도 혼화제의 사용량을 증가시키면 슬럼프와 공기량은 안정되어 작업성이 좋아지는 효과를 얻었다.
- 3) 압축강도를 측정한 결과 미립자 함유량이 증가할수록 압축강도는 커지는 경향이 나타났으며, 최대 1.9MPa까지 커짐을 확인하였다. 또한 혼화제의 사용량이 증가할수록 압축강도는 증가하는 경향이 나타났으며, 최대 1.4MPa까지 증가함을 확인하였다. 이를 통해 미립자와 혼화제의 사용량이 콘크리트의 압축강도에 영향을 미치는 것을 확인하였다.
- 4) 콘크리트의 길이변화율을 측정한 결과 1주부터 3개월까지 미립자 함유량이 증가할수록 길이변화율은 낮게 나타났다. 이는 미립자의 함유량이 증가함에 따라 콘크리트의 길이변화율에 대한 영향을 준다는 것을 의미한다. 또한 혼화제 사용량을 추가적으로 사용하면 길이변화율은 낮게 나타나 약간의 저감효과가 있었다.

- 5) 콘크리트의 동결융해에 대한 저항성 측정결과 공기량이 가장 큰 미립자 함유량 7%, 혼화제 사용량 0.70%인 FP7-AD70 공시체에서 무게감소량이 가장 작게 나타났으며, 상대동탄성계수는 가장 크게 나타났다. 반면 공기량이 작고 슬럼프가 크며 재료분리가 나타난 미립자 함유량 0%, 혼화제 사용량 0.7%인 FP0-AD70 공시체가 무게감소량이 가장 크고, 상대동탄성계수는 가장 작게 나왔다. 하지만 혼화제 사용량을 증가시키면 무게 감소량이 작게 나타나고, 상대동탄성 계수는 크게 나타났다. 이는 혼화제 사용량을 증가시키면 동결융해에 대한 저항성은 좋게 나타나는 것으로 확인되었다.
  
- 6) 콘크리트의 표면박리 실험 결과 미립자의 함유량이 증가할수록 무게감소량은 더 크게 나타났다. 이러한 현상은 미립자 함유량이 감소할 경우 재료분리가 일어나 굵은골재가 침하하면서 피막층이 두껍게 형성되어 표면박리가 작게 나타난 것이며, 미립자 함유량이 증가할 경우 자갈과 잘 혼합되어 피막층이 얇게 형성되어 표면박리가 크게 나타났기 때문이다. 표면박리는 자갈의 피복두께에 영향을 주는 것으로 확인된다. 한편, 혼화제 사용량이 증가함에 따라 무게감소량은 약 20배 더 작게 나타났다. 이것은 혼화제가 가지고 있는 특성에 의해 콘크리트가 안정화되어 표면박리가 미세하게 나타났기 때문이다.
  
- 7) 파일럿 규모 공시체 실험결과에 의하면 레미콘 회사에서 공급받은 부순모래는 불량한 입도분포를 가지고 있었다. 그러나 혼화제 사용량을 증가시키면 슬럼프, 공기량, 압축강도, 동결융해에 대한 저항성도 커졌다. 하지만 파일럿 규모 공시체 실험은 표준 공시체 실험보다 콘크리트 품질변동과 표준편차가 심하여 표준공시체 실험보다는 품질이 떨어지는 것을 확인하였다. 그러나 혼화제 사용량을 조절함으로써 실험결과는 모두 지방서의 품질기준을 만족하였다.
  
- 8) 본 연구에서는 미립자 함유량이 증가하면 작업성은 떨어지나 콘크리트 성능에 미치는 영향은 미립자 함유량이 감소한 것 보다 더 좋은 영향을 주었다. 한편 미립자 함유량의 증가로 작업성이 저하되는 경우 고성능 AE감수제 사용량을 증가시키면 작업성을 향상시킬 수 있었다. 따라서 미립자의 함유량이 허용범위를 벗어나도 고성능 AE 혼화제 사용량을 가감하면 품질기준을 확보할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 고경택, 강수태, 김방욱, 이종석, 이장화(2004), “부순모래를 사용한 콘크리트의 품질평가”, 대한토목학회 학술 발표논문집, pp. 562~567.
2. 고경택, 류금성, 이장화(2006), “부순모래의 입형이 콘크리트에 미치는 영향”, 대한토목학회 논문집, Vol.26 ,No.1A, pp. 229~236.
3. 국토교통부(2016), “콘크리트 표준시방서”
4. 김상태(2005). “부순모래 콘크리트의 장기강도 특성에 관한 연구”, 학위논문(석사), 부경대학교 산업대학원, 토목공학과.
5. 김진철(2015), “포장콘크리트의 스케일링 저항성 평가방법 비교”, 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, pp. 23~30.
6. 노승철(2012), “동결융해 파손사례 분석을 통한 콘크리트 포장의 품질관리 개선 방안”, 중앙대학교 건설대학원.
7. 대한주택공사(1996), “콘크리트용 부순모래(碎砂)의 실용화방안 연구”, pp. 121~184.
8. 서강현, 박대효(2007), “부순모래를 사용한 콘크리트의 최적배합” 학위논문(석사), 한양대학교 공학대학원, 토목구조 및 재료 전공.
9. 안지환(2017). “콘크리트 동결융해 저항 공극구조 매개변수 도출 및 공용성 분석”, 학위논문(박사), 중앙대학교 대학원, 토목공학과 도로 및 교통공학전공.
10. 이규삼(2008), “혼화재 조건에 따른 콘크리트의 동결융해 저항성과 공극특성”, 학위논문(석사), 서울시립대학교 산업대학원, 토목공학과 구조전공, pp.12~14.
11. 이승태(2015), “콘크리트의 공극구조와 스케일링 저항성과의 관계”, 한국도로학회 학술발표회 논문집, pp. 68.
12. 한국시험공사 품질시험원(2016), “콘크리트 표준시방서”
13. 최영화(1988), “쇄석콘크리트의 형질에 관한 실험적 연구” 학위논문(박사), 충남대학교 대학원, 건축공학과 건축구조전공, pp. 40~60.
14. 한국도로공사(2012), “고속도로공사 전문시방서”
15. 한천구(1991) “충북지역 광산폐석의 콘크리트용 골재화에 관한 연구” 대한건축학회, Vol.11, No.2, pp. 569~572.
16. 한천구, 반호용, 유현기, 윤기원(1995) “부순모래 치환 잔골재를 이용한 콘크리

- 트의 배합설계에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 Vol.11 No.10, pp. 389~395.
17. KS F 2456 급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법
  18. KS F 2403 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작 방법
  19. KS F 2402 콘크리트의 슬럼프 시험 방법
  20. KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험 방법
  21. KS F 2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법
  22. KS F 2424 모르타르 및 콘크리트의 길이변화 시험방법
  23. KS F 2456 급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법
  24. KS F 2501 시료의 채취 방법
  25. KS F 2502 골재의 체가름 시험 방법
  26. KS F 2504 잔골재의 밀도 및 흡수율 시험방법
  27. ASTM C1202~97,(1997),“Standard Test Methodfor Electrical Indication oncrete’s Ability to Resist ChlorideIon Penetration,”ASTM,USA.
  28. Ahmed E. Ahmed and Ahmed A. El-Koued(1989). “Properties of Concrete Incorporating Nature and Crushed Stone Very Fine Sand”, ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 4, pp. 417~424.
  29. Celik, T., Marar, K., Newcomb, D. E(1996), “Effects of crushed stone dust on some propertes of concrete”, Cement and concrete resuarch, Vol. 26., No. 7, pp. 1121~1130.
  30. Collins(1944), A. R. “THE DESTRUCTION OF CONCRETE BY FROST.” Journal of the institution of civil engineers 23.1 : 29~41.
  31. Fagerlund, Göran(1995). “Frost resistance of high performance concrete–some theoretical considerations.” Durability of High Performance Concrete: In Proceedings of the RILEM International Workshop.
  32. Fournier B. Berube M.A., Vezina D(1987), “Condition survey of concrete structures built with potentially alkali reactive limestone aggregates from the Quebec City area, in: J. Scanlon (Ed.)”, ACI Special Publication SP-100, American Concrete Institute, Detroit, pp. 1343~1361.
  33. Forster, S. W(1994), “Soundness, deleterious substances, and coatings”, in significance of tests and properties of concrete and concrete–marking

- materials, ASTM special technical publication 169 C, Philadelphia, PA, pp. 411~420.
34. Foy C., Pigeon M., Banthia N(1988), "Freeze - thaw durability and deicer salt scaling resistance of a 0.25 water - cement ratio concrete", Cem. Concr. Res. 18, pp. 604~614.
  35. Fukushi(1985), I. "Carbonation and durability of reinforced concrete buildings." Cement Concr.(Jpn) 461, 8~16.
  36. Gaynor, R. D., Meininger(1983), R. C., "Evaluating concrete sands", concrete international, pp. 53~60.
  37. Ghosh, R. K., Sethi, K. L(1970), "Suitability of manufactured sand for marking quality concrete", Journal of indian roads congress, New Delhi, Vol. 33, No. 2, pp. 337~357.
  38. Goldbeck, A. T(1938), "Stone sand, Engineering Bulletin", No. 10, National crushed stone association, Washington D. C.
  39. Hudson, B. P(1995), "Effect of manufactured aggregate and sand shape on concrete production and placement", Svedala barmac New Zealand Limited, Report.
  40. Hudson, B. P.(1997), "Manufactured sand for concrete", The Indian concrete journal, pp. 237~240.
  41. Kawano Sakai(1980) "Design and construction of concrete factory products and precast concrete" pp. 120~123.
  42. Kalcheff, I.(1997), "Portland Cement Concrete with Stone Sand," Special Engineering Report, National Crushed Stone Association, Washington DC, pp. 1~20.
  43. Kronlof, A.(1994), "Effects of very fine aggregate on concrete strength", Materials and Structures, RILEM, Vol. 27., pp. 15~25.
  44. Ikeda Masashi(1994), "Ogawara Province, Tsuji Yukiwa, Tazawa Yuichi: The surface of the sand, the shape of the sand, the various aspects of the concrete. Impact" Concrete Corporation Annual Report, Vol.16, No.1, 1994. pp. 325~328.
  45. Mc Keagney, R. B(1985), "Stone sand, are specifications appropriate?",

- Pit and Quarry, pp. 57~60.
46. Mio Miyazaki(1982). "Regarding the quality of crushed sand concrete" Koga Bunshun, pp. 64~73.
  47. Nagaraj, T. S., Banu, Z.(1998), " Efficient utilization of rock dust and pebbles as aggregate", The indian concrete journal, pp. 106~111.
  48. Nichols, F.P. Jr.(1982), "Manufactured sand and crushed stone in portland cement concrete", Concrete international, pp. 56~63.
  49. Nishibayashi, S., K. Yamura, and H. Matsushita(1987). "A rapid method of determining the alkali-aggregate reaction in concrete by autoclave." 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete.
  50. Pigeon M., Pleau R., Aitcin P.C.(1986), "Freeze - thaw durability of concrete with and without silica fume in ASTM C666 (Procedure A) test method: internal cracking versus surface scaling", Cem. Concr. Aggreg. 8 (2) pp. 76~85.
  51. Pigeon, M., Pleau, R.(1995), "Durability of concrete in cold climates", E&FN SPON.
  52. Pleau R., Pigeon M.(1996), "The use of the flow length concept to assess the efficiency of air entrainment with regards to frost durability: part I -Description of the test method", Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 18, No. 1, pp. 19~29.
  53. Pleau R., Pigeon M., Laurencot J.L., Gagne R.(1996), "The use of the flow length concept to assess the efficiency of air entrainment with regard to frost durability: Part II -Experimental results", Cement, Concrete and Aggregate, Vol.18, No.1, pp. 30~41.
  54. Powers T.C(1945). "A working hypothesis for further studies of frost resistance." Journal of the American Concrete Institute, Vol. 16(4). pp. 245~272.
  55. Powers T.C.(1948), Brownyard T.L. . "Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste" Research Bulletin222, Portland Cement Association.
  56. Powers T.C(1954). " The air requirement of frost-resistant concrete."

- Proceedings of the Highway Research Board, Vol. 29, pp. 184~211.
57. Powers T.C(1965). "Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete", ACI Journal Proc., 50(5), pp. 741~760.
  58. Powers T.C(1965). "Topics in concrete technology 4. Characteristics of airvoid systems", Journal of the PCA Research and Development Laboratories, Vol.7, No.1, pp. 23~41.
  59. Rostasy, F. S., U. Schneider, and G. Wiedemann(1979). "Behaviour of mortar and concrete at extremely low temperatures." Cement and Concrete Research 9.3 : pp. 365~376.
  60. Saunders, C. H. Jr(1995), "Manufactured sand usage in north carolina", Third annual symposium proceedings, Center for aggregate research, TX.
  61. Siebel E.(1989), "Air-void characteristics and freezing and thawing resistance of superplasticized air-entrained concrete with high workability, in: V.M. Malhotra (Ed.)", ACI Special Publication SP-119, pp. 297~319.
  62. Takemura, K, and Abe, Y(1983). Concrete with crushed stone dust and fly ash as the fine aggregate. Japan: N. p. Web.
  63. Valenza II J.J., Scherer G.W.(2007), "A review of salt scaling: I.Phenomenology", Cement and Concrete Research 37, pp. 1007~1034.
  64. Verbeck. G, P. Klieger(1957), "Studies of "salt" scaling of concrete", Highw. Res. Board Bull. 150. pp. 1~17.
  65. Wiedemann. G(1982), "Zum Einflubtiefer Tcmpcraturen auf Festingkeit und Ferformung von Dcton' Dissertation Technische Universiit Braunschweig, pp. 149.
  66. Yamato Takeshi(1997) "Overseas trends in concrete recycling" Concrete Corporation Annual Report Vol.35, No.7, 1997. pp. 19~22.